

MARIA ISABEL CASTREGHINI DE FREITAS VIADANA

Modelos Matemáticos para Refinamento de Imagens de Satélite TM Utilizando Feições Retas como Controle

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas para
obtenção do Grau de Mestre em Ciências
pela Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

1989

MARIA ISABEL CASTREGHINI DE FREITAS VIADANA
ENGENHEIRO CARTÓGRAFO

MODELOS MATEMÁTICOS PARA REFINAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE
TM UTILIZANDO FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Ciências Geodésicas para
obtenção do Grau de Mestre em Ciências
pela Universidade Federal do Paraná.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
1989

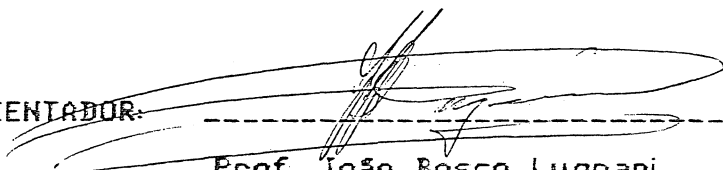
MODELOS MATEMÁTICOS PARA REFINAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE
TM UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

por

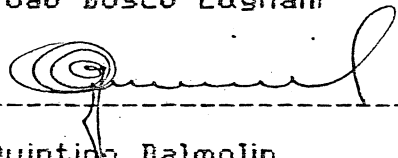
MARIA ISABEL CASTREGHINI DE FREITAS VIADANA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pela Comissão formada pelos professores:

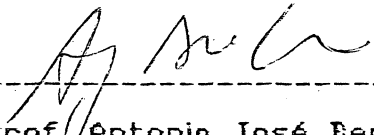
ORIENTADOR:



Prof. João Bosco Lugnani



Prof. Quintino Balmolin



Prof. Antonio José Berutti Vieira

Aos meus pais Áurea e Anterino.
Ao meu querido Adler.

AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Dentre estes, o meu agradecimento especial:

- ao Professor João Bosco Lugnani pelo incentivo e pela dedicada orientação;

- ao Professor Gilberto José Garcia pela confiança e pelo apoio material e logístico;

- aos Professores João Fernando Custódio da Silva, Antônio José Berutti Vieira, Henrique Firkowski e Hideo Araki pelas sugestões apresentadas;

- ao Professor Camil Gemaël, pela sua dedicação ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas;

- à FCT - UNESP - Campus de Presidente Prudente, pela cessão do instrumental do laboratório de Aerofotogrametria;

- ao CNPq pela bolsa concedida;

- à CAPES - PICO, pela bolsa auxílio-deslocamento concedida;

- aos desenhistas Arnaldo Rosalém e Elen A. Andreolli pelos desenhos e tabelas;

- ao amigo Marcelo Marchesin pela revisão e correção do texto em inglês;

- e finalmente, aos meus amados Adler e Deborah, pela paciência e pelo constante apoio, sem os quais não seria possível a finalização deste trabalho.

SUMÁRIO

	PÁG.
TÍTULO	i
TERMO DE APROVAÇÃO	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO01
1.1. EM BUSCA DA INFORMAÇÃO CIENTÍFICA	01
1.2. PROPOSTA DA PESQUISA	04
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA	05
1.4. ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO	06
1.5. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA	07

CAPÍTULO II

2. CONCEITOS BÁSICOS	08
2.1. CORREÇÃO GEOMÉTRICA E REFINAMENTO DE IMAGENS LANDSAT	08
2.2. FEIÇÕES - UM NOVO CONCEITO	12

CAPITULO III

3.	OBTENÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE E DE FEIÇÕES RETAS . . .	16
3.1.	CRITÉRIOS DE ESCOLHA DE PONTOS E DAS FEIÇÕES RETAS NA IMAGEM E NAS CARTAS TOPOGRÁFICAS	16
3.1.1.	Os Pontos e as Feições Retas na Imagem de Satélite	17
3.1.2.	Os Pontos e as Feições nas Cartas Topográficas	18
3.1.3.	Compatibilização entre o Sistema de Coordenadas do Monocomparado e o da Carta	20

CAPITULO IV

4.	MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES PARA PONTOS DE CONTROLE	22
4.1.	MODELOS MATEMÁTICOS	22
4.1.1.	Polinômio do Primeiro Grau	22
4.1.2.	Equação Projetiva	23
4.2.	AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES	23
4.2.1.	Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Primeiro Grau	25
4.2.2.	Ajustamento Aplicado à Equação Projetiva	30
4.3.	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	32
4.3.1.	Fluxograma	32
4.3.2.	Critério de Convergência	34

CAPITULO V

5.	MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES PARA FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE	36
----	--	----

5.1. MODELOS MATEMÁTICOS	38
5.1.1. Polinômio do Primeiro Grau Adaptado a Feições Retas	38
5.1.2. Polinômio do Segundo Grau Adaptado a Feições Retas	39
5.1.3. Polinômio do Terceiro Grau Adaptado a Feições Retas	39
5.1.4. Equação Projetiva Adaptada a Feições Retas	40
5.2. AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES	40
5.2.1. Ajustamento Aplicado ao Polinômio do Primeiro Grau Adaptado a Feições Retas . .	42
5.2.2. Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Segundo Grau Adaptado a Feições Retas . .	48
5.2.3. Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Terceiro Grau Adaptado a Feições Retas . .	51
5.2.4. Ajustamento Aplicado à Equação Projetiva Adaptada a Feições Retas	54
5.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	59
5.3.1. Fluxograma	59
5.3.2. Critério de Convergência	61

CAPÍTULO VI

6. TESTES E RESULTADOS	62
6.1. SIMULAÇÃO UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE . . .	63
6.1.1. Teste Utilizando-se a Equação Projetiva . . .	63
6.1.2. Teste Utilizando o Polinômio de Primeiro Grau	66
6.2. SIMULAÇÃO UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE	67
6.2.1. Teste Utilizando-se a Equação Projetiva . .	68

6.2.2. Teste Utilizando-se o Polinômio de Primeiro Grau	71
6.2.3. Teste Utilizando-se o Polinômio de Segundo Grau	73
6.2.4. Teste Utilizando-se o Polinômio de Terceiro Grau	77
6.3. TESTES COM DADOS REAIS UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	80
6.3.1. TESTES PARA O SETOR DA IMAGEM TM PERTENCENTE AO FUSO CUJO MERIDIANO CENTRAL É O DE 45°W	83
6.4. TESTES COM DADOS REAIS UTILIZANDO FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE	85
6.4.1. TESTES PARA O SETOR DA IMAGEM PERTENCENTE AO FUSO CUJO MERIDIANO CENTRAL É O DE 45°W	88

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .	94
7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	94
7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE	97
7.3. CONCLUSÕES	101
7.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁG.
6.1.1.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA	64
6.1.1.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA	65
6.1.1.3.	COORDENADAS AJUSTADAS E TRANSFORMADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	65
6.1.2.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	66
6.1.2.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	66
6.1.2.3.	COORDENADAS AJUSTADAS E COORDENADAS TRANSFORMADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	67
6.2.1.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA ADAPTADA A FEIÇÕES	69
6.2.1.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA	70
6.2.1.3.	COORDENADAS AJUSTADAS DOS PONTOS CENTRAIS DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO	70
6.2.2.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	71
6.2.2.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	72
6.2.2.3.	COORDENADAS AJUSTADAS E COORDENADAS TRANSFORMADAS DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO	72
6.2.3.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	75
6.2.3.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	76

6.2.3.3.	COORDENADAS AJUSTADAS E TRANSFORMADAS DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO PARA O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	77
6.2.4.1.	VALORES DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO PARA O POLINÔMIO DE TERCEIRO GRAU ADAPTADO A FEIÇÕES . .	78
6.2.4.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS, REAIS E APROXIMADOS PARA O POLINÔMIO DE TERCEIRO GRAU	79
6.2.4.3.	COORDENADAS AJUSTADAS E TRANSFORMADAS DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO	80
6.3.1.1.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	84
6.3.1.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA	85
6.3.1.3.	MÉDIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NA DIREÇÃO N PARA AS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO E RESPECTIVOS EMQs PARA MC: 45°W	85
6.4.1.1.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU	89
6.4.1.2.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	90
6.4.1.3.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA O POLINÔMIO DE TERCEIRO GRAU	91
6.4.1.4.	PARÂMETROS AJUSTADOS E RESPECTIVOS DESVIOS- PADRÃO PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA	92
6.4.1.5.	MÉDIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS E EMQs PARA OS PONTOS E FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO PARA OS TESTES COM A IMAGEM TM - MC: 45°W	93
7.1.1.	MÉDIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS E EMQs PARA OS TESTES COM PONTOS DE CONTROLE	95
7.2.1.	MÉDIA DOS ERROS PLANIMÉTRICOS E EMQs PARA OS TESTES COM FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE	98

7.2.2. MÉDIA GERAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS $\langle \overline{E_p} \rangle$ E DOS	
ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS $\langle \overline{EMQ_p} \rangle$ ENTRE OS	
VALORES DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE	
VERIFICAÇÃO	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
1.1.1. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE INFORMAÇÃO CIENTÍFICA E SUAS FONTES	03
1.4.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO ESTADO DE SÃO PAULO	06
3.1.1.1. IMAGEM NO PORTA-PLACAS DO MONOCOMPARADOR (VISTA DE CIMA)	18
3.1.2.1. DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO COBERTA PELA IMAGEM LANDSAT APRESENTANDO O NÚMERO DE CONTROLE DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS DO MAPEAMENTO DO IBGE DE 1969 - ESCALA 1:50.000	19
3.1.3.1. IMAGEM REFERENCIADA AOS SISTEMAS DE COORDENADAS DO MONOCOMPARADOR (x , y) E DA CARTA (E , N)	21
4.2.1.1. PADRÃO DA MATRIZ A NO AJUSTAMENTO PARAMÉTRICO DO POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	26
4.2.1.2. PADRÃO DA MATRIZ N PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	28
4.2.2.1. PADRÃO DA MATRIZ A PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	31
4.2.2.2. PADRÃO DA MATRIZ N PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE	32
5.1. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO SEGMENTO DE RETA AB REFERENTE AO SISTEMA DE COORDENADAS (x , y)	36
5.2.1.1. PADRÃO DA MATRIZ B PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU ADAPTADO A FEIÇÕES RETAS	43
5.2.1.2. PADRÃO DA MATRIZ A PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU ADAPTADO A FEIÇÕES RETAS	44
5.2.1.3. PADRÃO DA MATRIZ N PARA O POLINÔMIO DE PRIMEIRO GRAU ADAPTADO A FEIÇÕES RETAS	46

5.2.4.1.	PADRÃO DA MATRIZ B PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA ADAPTADA A FEIÇÕES RETAS	55
5.2.4.2.	PADRÃO DA MATRIZ A PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA ADAPTADA A FEIÇÕES RETAS	57
5.2.4.3.	PADRÃO DA MATRIZ N PARA A EQUAÇÃO PROJETIVA ADAPTADA A FEIÇÕES RETAS	58
6.1.1.	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE NA IMAGEM NA SIMULAÇÃO PARA PONTOS DE CONTROLE	63
6.1.1.1.	DISTRUBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO COM A EQUAÇÃO PROJETIVA	64
6.2.1.	DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES RETAS NA IMAGEM PARA SIMULAÇÃO COM FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE . . .	68
6.2.1.1.	DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES RETAS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO PARA O TESTE COM A EQUAÇÃO PROJETIVA	69
6.2.3.1.	DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES NA IMAGEM PARA O TESTE COM O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	73
6.2.3.2.	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS CENTRAIS DAS FEIÇÕES DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO PARA O TESTE COM O POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU	74
6.3.1.1.	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO NA IMAGEM TM -45°W	84
6.4.1.1.	DISTRIBUIÇÃO DAS FEIÇÕES DE CONTROLE E DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO JUNTAMENTE COM OS PONTOS CENTRAIS DAS FEIÇÕES DE VERIFICAÇÃO NA IMAGEM TM - 45°W	88
7.1.1.	REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E DOS VETORES DE ERROS PLANIMÉTRICOS PARA O TESTE COM MC : 45°W. ESCALA DA IMAGEM : 1:3.000.000. ESCALA DOS VETORES DE ERROS: 1:50.000.	96

7.2.1.	REPRESENTAÇÃO DAS FEIÇÕES DE CONTROLE E DOS VETORES DE ERROS PLANIMÉTRICOS PARA O MC: 45°W. ESCALA DA IMAGEM: 1:3.000.000. ESCALA DOS VETORES DE ERROS: 1:50.000.	100
--------	--	-----

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência do uso de feições retas como controle nos modelos matemáticos de refinamento da imagem TM do satélite LANDSAT fazendo-se uso de dados reais. Elaborou-se modelos polinomiais e o modelo da equação projetiva adaptados à pontos de controle e à feições retas como controle. Programas computacionais na linguagem BASIC foram implementados em microcomputador ITAUTEC PCXTII. A correção destes programas foi verificada através de simulação. Uma coleta de dados reais de carta e de imagem foi feita, após a qual se efetuou o teste para o setor da imagem pertencente ao fuso da projeção UTM cujo meridiano central é o de $45^{\circ}W$. Os resultados obtidos utilizando-se simulação e dados reais são apresentados e discutidos, mostrando a eficiência do uso de feições retas como controle. No caso deste trabalho, os resultados obtidos foram equivalentes aos apresentados pelo INPE.

ABSTRACT

The main aim of this dissertation is to evaluate the efficiency of the use of straight features as control in the mathematical model of TM-LANDSAT image refining making use of real data. Polynomial models and the projective equation model were adapted to control points and to straight features as control. Computer programs in BASIC were implemented in a ITAUTEC PCXTII microcomputer. The correction of these programs were checked through simulation. A sampling of real data from maps and from images was made, after which it followed a test for the image sector belonging to the UTM Projection fuse with central meridian equal to 45 degrees W . The obtained results using simulation and real data are presented and discussed showing the efficiency of the use of straight features as control. The results, in this case, were equivalent to the ones obtained by INPE.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. EM BUSCA DA INFORMAÇÃO CIENTÍFICA

O Sensoriamento Remoto é uma ciência que possibilita a obtenção de informações a respeito de um objeto sem o contato físico com o mesmo. Emprega-se o termo Sensoriamento Remoto para expressar a reunião e o processamento de informações a respeito do meio terrestre fazendo uso de dados obtidos por processos fotográficos ou correlatos, como os adquiridos de uma espaçonave ou de um satélite. Esta ciência oferece aos seus usuários um grande potencial de informações para a produção de uma base de dados consistentes para o gerenciamento de recursos naturais ou de uso do solo. Para atingir esta finalidade, seus dados dependem da resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal.

A *Resolução Espacial* pode ser definida de forma simplificada, como a mínima distância entre dois objetos que um sensor pode registrar distintamente. FORSHAW em 1941 define resolução espacial dividindo-a em quatro categorias que estão ligadas à:

- a) propriedades geométricas do sistema de imageamento
(*IFOV* - *Instantaneous Field of View*);
- b) habilidade de distinção entre dois pontos-alvos;
- c) habilidade de medição do período de repetitividade dos alvos;
- d) resolução como função das propriedades espectrais

do alvo que é o *Elemento de Resolução Efetiva*.

A *Resolução Espectral* de um dado instrumento de Sensoriamento Remoto é determinada pelas larguras das bandas utilizadas enquanto a *Resolução Radiométrica* é determinada pelo número discreto de níveis dentro dos quais um sinal pode ser dividido.

As interrelações entre *Resolução Espacial*, *Espectral* e *Radiométrica* são funções da prioridade de uma dada aplicação particular ou de um grupo de aplicações.

Quando mudanças trazem dificuldades de intersecção entre os três tipos de resolução já apresentados, surge um quarto tipo denominado *Resolução Temporal*.

Sendo uma premissa do sensoriamento remoto o monitoramento de mudanças através do tempo, a resolução temporal torna-se uma importante consideração quando da determinação das características de resolução de um sistema sensor. Há alguns poucos fenômenos e/ou objetos na natureza que não mudam com respeito a um outro ou a eles próprios no decorrer do tempo, segundo AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY 1011.

Para muitas feições físicas e culturais da paisagem, existem períodos de tempo considerados ótimos durante os quais tais feições podem ser melhor observadas. Estes períodos podem ser sazonais, ou somente algumas semanas ou mesmo dias, dependendo do tipo de aplicação a ser efetuado. Assim, para o monitoramento do crescimento de safra, por exemplo, imagens podem ser obtidas para um intervalo pré-determinado de tempo, talvez a cada dez dias. Entretanto, para monitorar padrões de crescimento urbano, o imageamento deve ser adquirido para um intervalo de tempo de um ano ou mais.

Os dados obtidos por Sensoriamento Remoto não constituem por si só a *Informação Científica*. É necessário que haja uma intersecção entre estes dados e as informações

reais obtidas do terreno (aqui denominados dados auxiliares), para que juntos e conectados através de um algoritmo e/ou teoria, possam dar origem à *Informação Científica* propriamente dita. Esta interrelação, segundo a AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY 1011, é representada esquematicamente pela Figura 1.1.1.

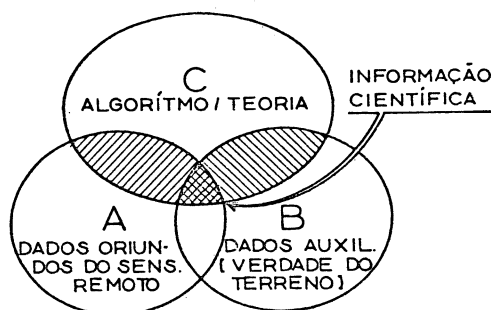


Figura 1.1.1 - Representação esquemática da relação entre Informação Científica e suas fontes.

Este trabalho visa buscar a interrelação apresentada anteriormente através da utilização de dados obtidos de imagens de satélite e de dados coletados de cartas topográficas, representando a verdade do terreno. Através da aplicação de algoritmos apropriados para o Refinamento de Imagens de Satélite utilizando-se pontos de controle ou feições retas como controle, pretende-se obter a *Informação Científica*.

Nos trabalhos que a literatura apresenta sobre o uso de feições, observa-se que as mesmas são aplicadas, na grande maioria das vezes, em testes utilizando-se dados gerados através de simulação. São exemplos os trabalhos de SOUZA 1161, TOMMASELLI 1171, dentre outros. É inegável a grande contribuição dos trabalhos utilizando simulação para o desenvolvimento deste novo conceito mas sente-se a necessidade, neste momento, de se testar modelos que utilizem feições e pontos de controle reais, sujeitos portanto a todas as limitações que os mesmos possam oferecer.

Com relação ao Refinamento de Imagens, os testes elaborados por MACHADO E SILVA [101, 111] e FORD [104] apresentam o trabalho com dados reais sobre imagens de excelente qualidade, em regiões bastante favorecidas de pontos de controle, que possibilitam uma distribuição quase que perfeitamente uniforme sobre toda a imagem ou sobre setor da mesma. Pretende-se com este trabalho testar os modelos de refinamento com pontos de controle e/ou feições reais (de terreno), sobre uma imagem comum que cobre o município de Rio Claro e que se apresenta pouco favorecida de pontos mas, com uma grande quantidade de feições retas.

Procedendo desta forma, os resultados que se pretende obter estarão muito próximos do que a realidade nos oferece, ou seja, limitados em função da qualidade da imagem estudada (presença de nuvens por exemplo), da disponibilidade de cartas topográficas da região devido a localização da área escolhida, do acesso, muitas vezes difícil, ao instrumental necessário para a coleta de dados, da inexperiência do operador, da capacidade do computador disponível para a execução dos programas computacionais, da dificuldade na determinação de pontos e feições de controle, da má distribuição destes pontos e/ou feições na imagem dentre outros problemas.

1.2. PROPOSTA DA PESQUISA

Apresenta-se como proposta da pesquisa inicialmente, a obtenção de dados oriundos de imagem analógica do sensor TM (THEMATIC MAPPER) do satélite LANDSAT-5; a obtenção de dados auxiliares, ou seja, a verdade do terreno, de cartas topográficas da área de estudo. De posse destes dados coletados será feita a intersecção dos mesmos através de algoritmos desenvolvidos para o refinamento de imagens de satélite utilizando-se feições retas em substituição a pontos de

controle através do Ajustamento de Observações. A análise da qualidade dos algoritmos desenvolvidos será feita utilizando-se pontos e feições de verificação. Vale lembrar que as feições podem ser utilizadas juntamente com pontos de controle ou em substituição a estes e que neste trabalho elas serão utilizadas exclusivamente *em substituição* a pontos de controle.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a eficiência do uso de feições em substituição a pontos de controle, quando aplicadas aos modelos de refinamento da imagem TM do satélite LANDSAT, utilizando-se dados reais.

São considerados objetivos específicos desta pesquisa:

- a) efetuar a coleta de dados de imagem através de um monocomparador e de dados de terreno através de cartas topográficas correspondentes a área de estudo;
- b) elaborar os modelos matemáticos de refinamento de imagens TM do satélite LANDSAT-5 adaptados à pontos de controle e adaptados a feições retas como controle e implementá-los, através de programas computacionais na linguagem BASIC, em microcomputador ITAUTEC PCXTII;
- c) testar os modelos matemáticos de ajustamento e os programas computacionais através de simulação;
- d) testar os modelos matemáticos para dados reais, previamente coletados, em testes com pontos de controle e em testes com feições retas como controle e apresentar os resultados na forma de tabelas e representações gráficas;
- f) comparar os resultados obtidos com os testes utilizando-se pontos de controle com os obtidos utilizando-se feições como controle, assim como com os obtidos pelo INPE.

1.4. ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para a execução desta pesquisa localiza-se no setor do Estado de São Paulo cujas coordenadas geográficas estão compreendidas aproximadamente entre 21 graus e 22 graus e 30 minutos de Latitude Sul e 47 graus e 48 graus e 30 minutos de Longitude Oeste (Figura 1.4.1). Esta área equivale à Órbita 220, Ponto 75 do WRS (Sistema Internacional de Referência), adotado para as imagens do satélite LANDSAT.

A justificativa para a escolha desta área é a de que ela envolve o Município de Rio Claro, facilitando assim o uso de algumas imagens e cartas já existentes no Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP - Campus de Rio Claro. Outra razão é a presença de vias de acesso dentre as quais autoestradas, estradas pavimentadas e estradas sem pavimentação, além de vias férreas presentes nesta região, fornecendo assim a maioria das feições retas utilizadas neste trabalho.

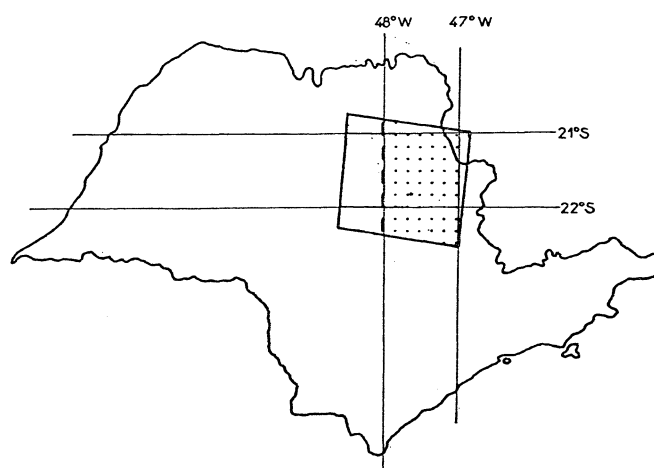


Fig. 1.4.1. : Localização da área de estudo no Estado de São Paulo.

A área escolhida apresenta também como característica a mudança de fuso da Projeção UTM, adotada nas cartas

topográficas utilizadas neste trabalho. Assim, para uma mesma imagem aparecem pontos e feições referentes ao fuso cujo meridiano central é o de 45°W (45 graus a oeste de Greenwich) e também outros pontos e feições referentes ao fuso cujo meridiano central é o de 51°W . Neste trabalho será utilizado o setor da imagem referente ao fuso cujo meridiano central é o de 45°W , que aparece hachurado na Figura 1.4.1.

1.5. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em sete capítulos sendo que no Capítulo I apresenta-se a introdução do trabalho onde se aborda o tema da pesquisa, são traçados os objetivos principal e específicos, é delimitada a área de estudo e é feita a apresentação da pesquisa. O Capítulo II trata dos conceitos básicos envolvendo informações sobre correção geométrica, refinamento de imagens de satélite, o conceito de feições e suas principais aplicações. O Capítulo III apresenta o procedimento adotado para a coleta de dados reais da imagem e das cartas topográficas assim como a compatibilização entre os sistemas de coordenadas.

O Capítulo IV descreve os modelos matemáticos e o ajustamento de observações adotados neste trabalho para a utilização de pontos de controle. Já o Capítulo V apresenta os modelos matemáticos e o ajustamento de observações adotados para a utilização de feições retas como controle. O capítulo VI apresenta os testes efetuados e os resultados obtidos tanto para pontos quanto para feições retas como controle. E finalmente, o Capítulo VII apresenta a análise dos resultados e as conclusões obtidas juntamente com as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1. CORREÇÃO GEOMÉTRICA E REFINAMENTO DE IMAGENS LANDSAT

A utilização de imagens de satélite requer, em muitos casos, que as mesmas estejam corrigidas das distorções geométricas a elas inerentes.

As distorções geométricas podem ser classificadas em *Distorções Externas e Internas*. Considera-se como externas as distorções cuja fonte é o comportamento dinâmico do satélite e como distorções internas as inerentes ao sistema de imageamento.

São consideradas fontes de *Distorções Externas* :

- a) a variação da orientação do satélite ao longo da cena;
- b) a variação da velocidade e da altitude do satélite;
- c) a rotação e a esfericidade da Terra.

E considera-se como principais fontes de *Distorções Internas* :

- a) o arrastamento da imagem durante uma varredura;
- b) a não linearidade do movimento do espelho;
- c) a variação do tempo útil de varredura.

Existem diferentes modelos para eliminar os efeitos provocados por estas distorções como o que analisa cada fonte de distorção separadamente, determinando a correção a ser aplicada a cada ponto da imagem (MACHADO E SILVA [18]). Outro modelo que pode ser utilizado é o que elimina praticamente

todas as distorções presentes na imagem e baseia-se na equação de colinearidade. Este modelo considera a interdependência entre as diversas distorções (MACHADO E SILVA [11]).

O procedimento para correção geométrica apresentado por MACHADO E SILVA em [10] foi desenvolvido num período em que o sensor RBV apresentava problemas técnicos e o sensor TM encontrava-se em fase de testes. Assim, os trabalhos com aplicação a cartografia apoiavam-se sómente nas imagens do sensor MSS. Os modelos de correção geométrica destas imagens consideravam as *Distorções Externas e Internas* descritas anteriormente.

As *Distorções Internas*, principais responsáveis pelas distorções geométricas das Imagens Landsat, são tratadas através da análise de cada fonte de distorção e posteriormente corrigidas para os pontos da imagem individualmente. Este modelo baseia-se nos dados de efemérides, de orientação do satélite e no modelo geométrico do Sistema de Imageamento, não necessitando de pontos de controle.

Segundo MACHADO E SILVA [10], após a correção geométrica obtém-se, para o caso de imagem do sensor MSS, a imagem *Bulk* corrigida das distorções geométricas descritas acima, mas ainda sem qualidade para servir de base planimétrica para a elaboração de cartas topográficas na escala 1:250.000 ¹. O Erro Médio Quadrático desta imagem apresenta-se próximo a 1,5 pixel (120 ± 20 metros). Portanto tal imagem necessita de passar por um processo de refinamento, através da aplicação de modelos polinômiais e do uso de pontos de controle, para a geração da

1 Considera-se uma imagem com qualidade para servir de base planimétrica para a elaboração de cartas na escala 1:250.000, aquela que apresenta tolerância planimétrica na restituição de 0,25 mm na escala da carta. Para a escala 1:250.000 este valor equivale a 62,5 m.

imagem MSS refinada, denominada *Precision*. Normalmente adota-se como pontos de controle de uma imagem de satélite cruzamentos de estradas, pontes, aeroportos, etc. Esta imagem refinada apresenta um Erro Médio Quadrático de aproximadamente 0,8 pixel (60 ± 15 metros), e possui qualidade geométrica para servir de base para a elaboração de cartas topográficas na escala 1:250.000. O modelo polinomial mais adequado para o refinamento de imagens MSS-LANDSAT, segundo estes testes de MACHADO E SILVA [10], é o Polinômio de Segundo Grau.

Este procedimento para a Correção Geométrica e Refinamento adotado pelo INPE apresenta, de maneira geral, resultados satisfatórios (exceção feita a região Norte do país, onde os pontos de controle são escassos).

Aparece como uma segunda opção para correção geométrica e refinamento de imagens o modelo apresentado por MACHADO E SILVA em [11] denominado Modelo Fotogramétrico.

O Modelo Fotogramétrico baseia-se na Equação de Colinearidade que estabelece a relação entre cada ponto da imagem, através de suas coordenadas (linha , coluna), com um ponto sobre o elipsóide de referência, através de suas coordenadas (latitude , longitude).

Este modelo considera as mesmas distorções externas e internas apresentadas anteriormente e é descrito detalhadamente em MACHADO E SILVA [11] e [12].

O Modelo Fotogramétrico aplicado a imagens MSS, segundo MACHADO E SILVA em [11], parte do conhecimento da posição, velocidade e orientação do satélite à cada segundo e da equação do perfil do espelho. Sua aplicação no refinamento de imagens MSS pode ser feita utilizando-se pontos de controle para a determinação dos parâmetros de atitude e o tempo associado a estes parâmetros. Pode-se também utilizar o processo de filtragem estocástica, através de dados de atitude enviados pela NASA para estimar os parâmetros de atitude para cada ponto de

controle. Este será responsável pelo refinamento progressivo dos parâmetros até que os mesmos converjam, ou que não haja mais pontos de controle. O processo de filtragem estocástica não obriga a localização de um número mínimo de pontos de controle. Esta característica é muito importante onde é difícil a obtenção destes pontos. Segundo MACHADO E SILVA em 1111, este modelo encontrava-se em fase experimental, sendo que os primeiros testes traziam otimismo quanto a qualidade dos resultados.

Já as imagens TM, segundo MACHADO E SILVA em 1121, apresentam-se em cinco níveis de Correção Geométrica, que serão considerados aqui conforme a qualidade de imagem, como:

a) nível 0 - neste nível realiza-se uma equalização radiométrica e uma reamostragem ao longo das linhas, que equivale às correções de perfil do espelho/comprimento das linhas, atraso na amostragem dos detetores e efeitos devido à rotação da Terra (BEZERRA 1021). Não é apresentado pelo INPE um valor para o EMQ de imagens neste nível de correção;

b) nível 1 - processado quando não se tem acesso aos dados de efemérides e atitude transmitidos pelo satélite. Obtem-se assim os dados de efemérides dos parâmetros orbitais do satélite e a atitude é considerada nula. Os procedimentos posteriores equivalem aos utilizados para a imagem no nível 2;

c) nível 2 - Neste nível aplica-se o modelo de colinearidade a duas grades primárias (25x18 "break-points"), onde para cada "break-point" conhece-se os pares ordenados (linha,coluna) e (latitude,longitude). As coordenadas geodésicas são transformadas para coordenadas plana-retangulares, numa dada projeção cartográfica, e daí para o Sistema de Referência Plano-Retangular da Imagem. Após isto é feito o cálculo dos parâmetros através de polinômios do quinto grau, aplicando-se o Método dos Mínimos Quadrados, relacionando coordenadas da grade (linha , coluna) com coordenadas plano-retangulares da

imagem (X_{im} , Y_{im}). Quando é aplicada a correção, as grades primárias são recuperadas através de polinômios e ampliadas através de interpolação linear e cúbica. Posteriormente aplica-se, analogamente, uma interpolação linear para a determinação das coordenadas planas-retangulares de imagem para cada ponto da imagem. As imagens TM deste nível são consideradas o produto padrão do INPE e apresentam Erro Médio Quadrático de 54 metros. Diariamente são aplicados os cálculos de correção geométrica para todas as cenas adquiridas, sendo armazenados os conjuntos de coeficientes dos polinômios do quinto grau. Quando se solicita uma imagem no Nível 2 de correção geométrica, o sistema recupera os coeficientes relativos a imagem em questão e dá prosseguimento a correção geométrica. Os polinômios de quinto grau agem portanto como simplificadores, economizando memória e tempo de processamento;

d) nível 3 : Aplica-se neste nível os mesmos procedimentos aplicados no nível 2, excluindo-se a aplicação de polinômios de quinto grau para a recuperação posterior das grades primárias. As imagens deste nível apresentam Erro Médio Quadrático de 50 metros;

e) nível 4 : Neste nível o modelo da equação de colinearidade é aplicado a uma grade de 386×18 "break-points", transformando-se posteriormente as coordenadas geodésicas em plana-retangulares no Sistema de Imagem. A grade é ampliada por interpolação cúbica ao longo da varredura e para cada ponto da imagem aplica-se a interpolação linear para determinar as coordenadas planas-retangulares da imagem. As imagens neste nível apresentam Erro Médio Quadrático de 47 metros.

2.2. FEIÇÕES - UM NOVO CONCEITO

Atualmente, está plenamente consagrado o uso de

controle convencional através de pontos individuais que relacionam o original cartografado com a verdade do terreno.

Porém, a identificação de pontos de controle, seja no trabalho com fotografias aéreas ou com imagens de satélite, pode ser dificultada em função da escala e da região em estudo. Com uma quantidade menor de pontos de controle de qualidade, em muitos casos o produto final poderá ser comprometido. A opção pelo uso de feições [13] surge como uma tentativa de minimizar esta dificuldade. O objetivo é usar as feições em substituição ao controle convencional, ou mesmo como complemento deste.

Segundo LUGNANI em [09], o termo feição é utilizado para denominar um objeto (ou parte dele) que possa ser representado por um segmento de curva espacial, como por exemplo uma estrada, uma via férrea, a borda de um prédio, etc.

Observa-se que em regiões desenvolvidas, a presença de obras construídas pelo homem é predominante, fornecendo grande quantidade de feições. Segundo LUGNANI em [07] e [09], as feições podem se apresentar como:

- a) FEIÇÃO ESPACIAL (ou ENTIDADE ESPACIAL) : trata-se de um objeto (ou parte dele) que pode ser representado por um único segmento no espaço;
- b) FEIÇÃO PLANA (ou ENTIDADE PLANA) : é uma feição espacial contida em um plano;
- c) FEIÇÃO RETA (ou *Edge*) : trata-se da feição espacial que pode ser considerada praticamente reta e é definida por 2 pontos;
- d) FEIÇÃO CURVA : trata-se da feição espacial que é definida por mais de dois pontos;
- e) FEIÇÃO DIGITALIZADA : é definida como um conjunto discreto de pontos representando uma feição;

No caso particular do trabalho com imagens de satélite,

com escalas usualmente muito pequenas para a identificação precisa de pontos de controle individuais, o uso de feições torna-se uma opção bastante atrativa. É lógico afirmar que trechos de estradas de ferro ou de estradas de rodagem, por exemplo, ou grandes construções como barragens, são mais facilmente identificados na imagem do que um cruzamento de estradas, o encontro de um rio e uma estrada, a cabeceira de um aeroporto, e outros pontos normalmente utilizados como controle para a correção geométrica e retificação de imagens de satélite.

Além da fácil identificação uma outra vantagem é a não necessidade de correspondência um à um entre pontos estabelecidos na imagem e na carta base adotada para fornecer a verdade do terreno.

Cada vez mais surgem aplicações bem sucedidas deste novo conceito em Fotogrametria e em Sensoriamento Remoto. São exemplos a Orientação Absoluta Analítica de Estereomodelos [13] e [16], a Resseção Analítica de Fotografias [9] e a Revisão de Mapas Digitais [13].

O uso da Equação Projetiva adaptada a feições para a correção geométrica de imagens Skylab, câmara S-190, foi testado com sucesso por LUGNANI em [9].

As feições planas podem dividir-se em dois grupos : feições retas e feições curvas. As feições retas e as feições curvas, já previamente definidas, apresentam como diferença fundamental o número de pontos para a sua definição. No caso da feição reta, "entidade de campo que pode ser representada por uma linha reta", segundo LUGNANI em [7] e necessitando de aplicação da equação da reta para sua reconstrução, dois pontos na carta são suficientes para que a mesma seja definida. Já a feição curva requer mais que dois pontos na carta para sua definição, necessitando de interpolação (por *splines* por exemplo) para a sua reconstrução.

As feições digitalizadas são armazenadas em arquivos através das coordenadas de seus pontos. Estas coordenadas podem ser obtidas por levantamento ou procedimentos geodésicos; por digitalização de modelos estereoscópicos através de instrumentos de restituição ou por digitalização de cartas topográficas disponíveis da região em estudo.

Neste trabalho são adotadas feições retas e as mesmas são utilizadas *em substituição* à pontos de controle. Alguns pontos e feições retas coletados são utilizados na análise da qualidade dos modelos matemáticos em questão. Nos testes utilizando-se pontos de controle são utilizadas feições retas para a verificação da qualidade dos modelos adotados muito embora se saiba que o uso de feições como verificação leva a uma superestimação dos valores dos erros.

Na coleta de dados das cartas topográficas, feições retas devem ser escolhidas e dois pontos de cada feição devem ter suas coordenadas registradas em arquivo.

Na coleta de dados de imagem deve-se cuidar para que o ponto identificado esteja dentro do objeto (ou de um setor dele) definido como a feição adotada, ou seja, entre os dois pontos escolhidos na carta topográfica.

Com respeito à qualidade das feições digitalizadas quando usadas em substituição a pontos de controle, todos os trabalhos específicos sobre o assunto, citados anteriormente, e especialmente LUGNANI em 1981, apresentam resultados comparáveis aos obtidos através de controle convencional, reafirmando a potencialidade do uso de feições como controle.

CAPITULO III

3. OBTENÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE E DE FEIÇÕES RETAS

3.1. CRITÉRIOS DE ESCOLHA DOS PONTOS E DAS FEIÇÕES RETAS NA IMAGEM E NAS CARTAS TOPOGRÁFICAS

De posse da imagem do sensor TM do satélite LANDSAT para o ano de 1986, iniciou-se o processo de seleção dos pontos e das feições retas que seriam utilizados para controle e para verificação dos modelos testados neste trabalho. Os pontos de controle utilizados foram, em sua maioria, cruzamentos de estradas, cruzamentos entre estradas e rios (pontes), cantos de aeroportos dentre outros. As feições retas adotadas são principalmente trechos de estradas pavimentadas ou sem pavimentação e trechos de pistas de aeroportos pertencentes à área de estudo.

Foram selecionadas 33 cartas topográficas de um total de 55. Este número é função da escolha de um setor da imagem para a aplicação dos testes e não do total da imagem, bem como de dificuldades na localização de algumas cartas. Os pontos e as feições retas escolhidos deveriam ser realmente identificáveis na imagem e na carta.

Para a seleção das feições retas levou-se em conta a distribuição, a quantidade, a qualidade e a posição da feição em relação as feições circunvizinhas. Após estas considerações, procedeu-se à leitura das coordenadas de imagem e de carta. Foram escolhidas feições que variam de 800 a 3.000 m de comprimento no terreno.

3.1.1 Os Pontos e as Feições Retas na Imagem de Satélite

Para a determinação das coordenadas de imagem (x, y) dos pontos e das feições de interesse, utilizou-se um monocomparador. Nesta pesquisa, o instrumento adotado foi o Stecometer, da Zeiss Jena, com precisão de leitura de 0,002mm.

A imagem de satélite utilizada é do Nível 2 e está na forma de transparência positiva, na escala 1:1.000.000. Para a obtenção das coordenadas de imagem dos pontos de controle ou de verificação, primeiramente identificou-se o ponto na carta topográfica. Buscou-se então o ponto correspondente na imagem de satélite e procedeu-se a leitura das coordenadas de imagem (x, y) do mesmo através do monocomparador. Fez-se um mínimo de quatro leituras e tirou-se a média. Esta operação foi repetida para todos os pontos de interesse na imagem.

Para a identificação de uma feição reta com correspondente na carta topográfica, procedeu-se a leitura das coordenadas de um ponto qualquer dentro do segmento de reta que representa a feição na imagem. Repetiu-se esta leitura por duas vezes em pontos diferentes sobre a feição e tirou-se a média. Repetiu-se esta operação para todas as feições de interesse.

Determinou-se na carta topográfica as coordenadas dos pontos extremos da feição de interesse. As coordenadas de imagem (x, y) coletadas, devem pertencer à feição dentro dos limites impostos pelos pontos extremos definidos na carta topográfica. Escolher um ponto fora destes extremos pode levar a erros que prejudicam os resultados do ajustamento. Não convém utilizar feições que não estão bem definidas na imagem. A seguir será detalhado o procedimento para a orientação da imagem e a leitura no monocomparador.

Sobre o porta-placas do instrumento monocomparador posicionou-se a imagem conforme a Figura 3.1.1.1.

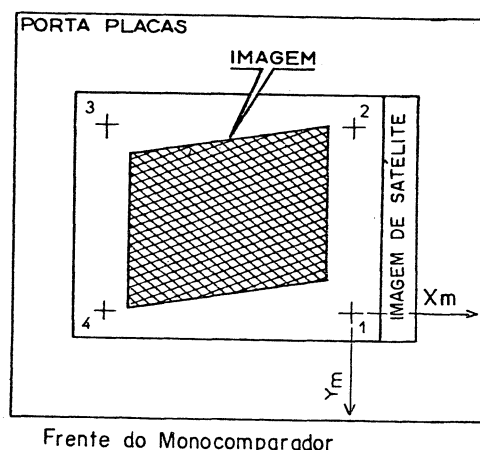


Figura 3.1.1.1. - Imagem no porta-placas do monocomparador (vista de cima)

Adotou-se que o sistema de eixos coordenados do monocomparador (x_m, y_m) possuía sua origem na cruz existente no canto inferior direito da imagem já posicionada no porta-placas como mostra a figura 3.1.1.1.

Os pontos e as feições de interesse tiveram suas posições marcadas na imagem através de um círculo traçado ao redor do ponto ou feição utilizando-se lápis dermatográfico e foram numeradas conforme a numeração adotada para suas correspondentes nas cartas topográficas.

3.1.2. Os Pontos e as Feições nas Cartas Topográficas

Fez-se uso neste trabalho de cartas topográficas elaboradas pelo IBGE, na escala 1:50.000, datadas de 1969 e 1979,

referentes à área de estudo. A Figura 3.1.2.1 apresenta a distribuição destas cartas no Estado de São Paulo, estando numeradas as folhas utilizadas nesta pesquisa.

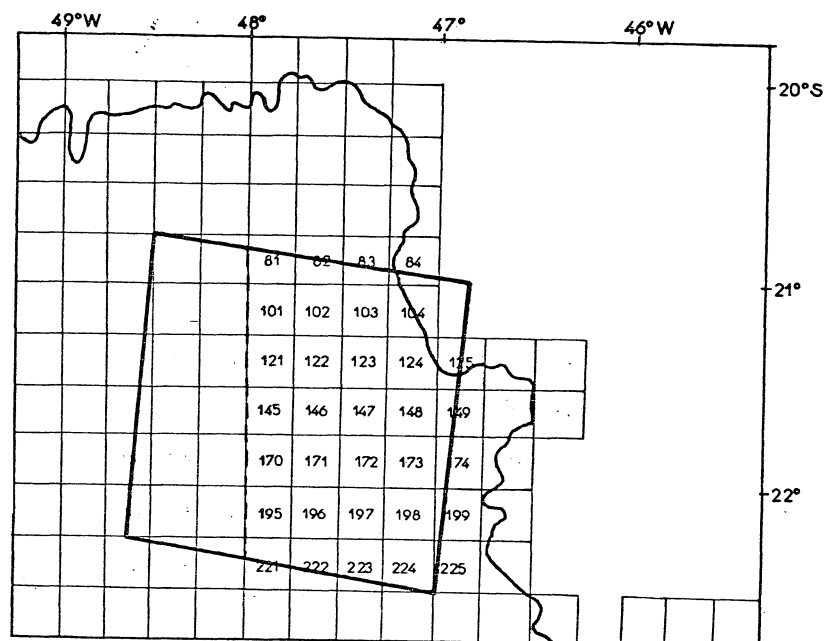


Figura. 3.1.2.1.: Detalhe da área de estudo coberta pela imagem LANDSAT apresentando o número de controle das cartas topográficas utilizadas no mapeamento topográfico do IBGE-Escala 1:50.000.

Para as coordenadas E e N de pontos pertencentes ao fuso com meridiano central de $45^{\circ}W$, a obtenção de coordenadas de pontos e de feições de interesse foi feita através de interpolação linear. Para tanto, foram coletados dados com o Coordenatógrafo de Precisão da Zeiss Jena, com precisão de 0,001'' (um milésimo de polegada). Com este instrumento foram feitas leituras das coordenadas dos pontos e das feições de interesse e dos vértices da(s) quadrícula(s) que o(s) envolve(m). Conhecidas as coordenadas verdadeiras dos vértices das quadrículas através das cartas topográficas, pode-se determinar os parâmetros de transformação que fornecem os valores das coordenadas verdadeiras dos pontos de interesse na feição.

Utilizou-se para este caso a Transformação Afim, que se mostrou bastante eficiente. Elaborou-se portanto, para efetuar esta transformação, programa em linguagem BASIC, utilizando o ajustamento pelo Método Paramétrico.

Buscando uma simplificação na coleta de dados, tentou-se obter coordenadas diretamente das cartas topográficas fazendo uso de um escalímetro e de um par de esquadros. Tal procedimento não se mostrou adequado e as aproximações dos valores das coordenadas conduziam a erros que poderiam comprometer o sucesso dos testes. em vista disto, esta forma simplificada de se efetuar a coleta de dados da carta foi desprezada.

3.1.3. Compatibilização entre o Sistema de Coordenadas do Monocomparador e o da Carta

Torna-se de importância fundamental conhecer a posição da imagem de satélite em relação ao Sistema de Coordenadas do Monocomparador e da Carta. A Figura 3.1.3.1 apresenta a imagem de satélite, sendo x_m e y_m os eixos do Sistema de Coordenadas do Monocomparador, com origem na cruz inferior direita da imagem, identificada na figura pelo número 1. O Sistema de Coordenadas da Carta na Projeção UTM (Universal Transverse of Mercator) é representado pelos eixos E e N. Para se trabalhar com estes dois sistemas deve-se efetuar duas translações e considerar o sentido positivo de crescimento do eixo x_m inverso ao do eixo N. Com isto é possível se efetuar os testes dos modelos matemáticos utilizando valores de menor magnitude para as coordenadas de terreno, o que facilita o ajustamento de observações.

O monocomparador "stecometer", estando conectado ao coordímetro e ao microcomputador, possibilita a leitura e

gravação de coordenadas de imagem de maneira rápida e eficiente.

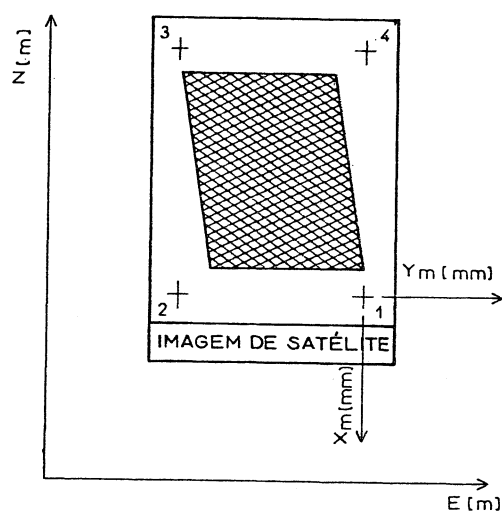


Figura. 3.1.3.1. : Imagem referenciada aos Sistemas de Coordenadas do Monocomparador (x_m, y_m) e da Carta (E, N) .

CAPITULO IV

4. MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES PARA PONTOS DE CONTROLE

Dentre os modelos matemáticos adotados com sucesso para o refinamento de imagens de satélite utilizando *pontos de controle*, escolheu-se para esta pesquisa o modelo polinomial. São desenvolvidos neste trabalho os Modelos Polinomiais do Primeiro Grau utilizando-se pontos de controle e do Primeiro ao Terceiro Graus adaptados ao uso de feições retas como controle. São também desenvolvidos os Modelos para a Equação Projetiva adaptados ao uso de pontos de controle e de feições retas como controle, os quais são testados e seus resultados comparados com os apresentados pelos Modelos Polinomiais.

4.1. MODELOS MATEMÁTICOS

4.1.1. Polinômio do Primeiro Grau

O modelo matemático que representa o polinômio de primeiro grau é dado pela expressão:

$$F_X \Rightarrow a_0 + a_1.x + a_2.y = X$$

$$F_Y \Rightarrow b_0 + b_1.x + b_2.y = Y \quad (4.1.1.1)$$

Sendo que:

F : representa a função;

a_i e b_i com $i = 0 \dots 2$: representam os parâmetros

incógnitos;

(x, y) : representam as coordenadas do ponto de controle na imagem;

(X, Y) : representam as coordenadas do ponto de controle na carta (coordenadas de terreno).

4.1.2. Equação Projetiva

O modelo matemático que representa a equação projetiva é dado pela expressão:

$$F_x \Rightarrow (a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1) = X$$

$$F_y \Rightarrow (a_6 \cdot x + a_7 \cdot y + a_8) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1) = Y \quad (4.1.2.1)$$

Onde:

a_i com $i = 1 \dots 8$: representam os parâmetros da transformação;

Os demais elementos equivalem aos apresentados no item 4.1.1.

A Equação Projetiva será utilizada neste trabalho com o objetivo de se avaliar os resultados que este modelo produz quando aplicado a imagens tomadas por sensores que apresentam sistemas de varredura como é o caso dos sensores atualmente implementados no satélite LANDSAT.

4.2. AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

Os modelos matemáticos que se utilizam de pontos de controle para o refinamento de imagens têm como observações as coordenadas de imagem e de carta destes pontos. Estas observações, quando são funções dos parâmetros, definem o modelo matemático de Ajustamento através do Método Paramétrico. Para tanto considerou-se as coordenadas de imagem

(x , y) constantes. Obteve-se com isto uma simplificação do modelo, considerando-se que as coordenadas oriundas de leituras no monocomparador apresentam melhor qualidade que as oriundas das cartas topográficas. Assim:

$$L_a = F(X_a) ,$$

onde:

F : representa a função;

L_a : representa o vetor das observações ajustadas;

X_a : representa o vetor dos parâmetros ajustados.

E cuja solução é dada pelas seguintes expressões, já na forma matricial:

$$X = - N^{-1}.U$$

$$N = (A^t.P.A)$$

$$U = (A^t.P.L)$$

$$U = A.X + L$$

$$L = L_o - L_b$$

$$X_a = X_o + X$$

$$L_a = L_b + U$$

Sendo:

X : vetor das correções aos parâmetros aproximados, com dimensão $X(u)$;

U : vetor dos resíduos, com dimensão $U(n)$;

X_o : vetor dos parâmetros aproximados, com dimensão $X_o(u)$;

L_b : vetor das observações, com dimensão $L_b(n)$;

L_o : vetor das observações estimadas, com dimensão

$$L_0(n);$$

A : matriz de coeficientes do sistema linearizado por série de Taylor com ponto de expansão X_0 , com dimensões

$$A(n,u);$$

P : matriz dos pesos, com dimensões $P(n,n)$.

Onde :

n = número de equações;

u = número de parâmetros.

Para se calcular o valor dos pesos das observações sabe-se que :

$$P = \text{Var}_{\text{prio}} \cdot \text{MVC}_{\text{Lb}}^{-1} \quad (4.2.1)$$

Onde:

Var_{prio} = variância da unidade de peso à priori;

MVC_{Lb} = Matriz Variância-Covariância das Observações.

A variância da unidade de peso à posteriori é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Var}_{\text{post}} = (V^t \cdot P \cdot V) / GL \quad (4.2.2)$$

Onde : Var_{post} = variância da unidade de peso à posteriori

GL = graus de liberdade

$$GL = n - u$$

4.2.1. Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Primeiro Grau

Modelo Matemático

O modelo matemático para o Polinômio do Primeiro Grau utilizando-se pontos de controle é apresentado pela expressão (4.1.1.1).

Matriz A

A matriz A compõem-se das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros. A expressão geral da matriz A é dada por:

$$A_i = \partial F / \partial X_{ai} \Big|_{X_{ai} = X_{ai-1}} \quad (4.2.1.1)$$

A seguir, apresentam-se as derivadas parciais da matriz A em relação aos parâmetros:

$$\begin{array}{ll} \partial F_X / \partial a_0 = 1 & ; \quad \partial F_Y / \partial a_0 = 0 \\ \partial F_X / \partial a_1 = x & ; \quad \partial F_Y / \partial a_1 = 0 \\ \partial F_X / \partial a_2 = y & ; \quad \partial F_Y / \partial a_2 = 0 \\ \partial F_X / \partial b_0 = 0 & ; \quad \partial F_Y / \partial b_0 = 1 \\ \partial F_X / \partial b_1 = 0 & ; \quad \partial F_Y / \partial b_1 = x \\ \partial F_X / \partial b_2 = 0 & ; \quad \partial F_Y / \partial b_2 = y . \end{array}$$

A matriz A apresenta o seguinte padrão:

	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
F_{X_1}						
F_{X_2}						
F_{X_3}						
F_{X_n}						
F_{Y_1}						
F_{Y_2}						
F_{Y_3}						
F_{Y_n}						

Figura 4.2.1.1. - Padrão da matriz A no ajustamento paramétrico do Polinômio do Primeiro Grau utilizando pontos de controle.

Matriz dos Pesos (Matriz P)

A Matriz dos Pesos compõem-se dos pesos atribuídos a cada uma das observações.

A expressão geral para a determinação dos pesos das observações é dada pela expressão (4.2.1).

A Matriz P, supondo-se inexistência de correlação entre as observações, apresenta o padrão diagonal. A variância das observações à priori é arbitrada e geralmente se utiliza o valor " 1 " (um). Neste trabalho, visando obter uma matriz N com elementos de valores nem extremamente grandes, nem extremamente pequenos, o que poderia comprometer a sua inversão, optou-se por arbitrar o valor para a variância das observações a priori próximos aos valores das variâncias das observações. Com isto, a matriz dos pesos apresenta-se o mais próxima possível da matriz identidade.

Vetor L_0

O vetor L_0 representa o vetor das observações estimadas e é dado pela expressão :

$$L_0 = F(X_0) \quad (4.2.1.2)$$

Este vetor depende da função e dos elementos do vetor dos parâmetros aproximados (vetor $X_0(n)$).

Vetor L

O vetor L é dado pela seguinte expressão:

$$L = L_0 - L_b \quad (4.2.1.3)$$

Trata-se portanto do vetor das diferenças entre o vetor das observações estimadas ($L_0(n)$) e o vetor das observações ($L_b(n)$).

Solução do Modelo Matemático pelo Método dos Mínimos Quadrados

Matriz N

A matriz N, ou matriz Normal, é dada pela expressão:

$$N_i = A_i^t \cdot P \cdot A_i \quad (4.2.1.4)$$

O padrão da matriz N para o caso do Modelo Polinomial do Primeiro Grau é apresentado na Figura 4.2.1.2.

Vetor U

O vetor U apresenta-se da seguinte forma :

$$U_i = A_i^t \cdot P \cdot L_i \quad (4.2.1.5)$$

Matriz N-Inversa

A matriz N-Inversa é calculada através do programa VERSOL para inversão de matrizes adaptado a linguagem BASIC.

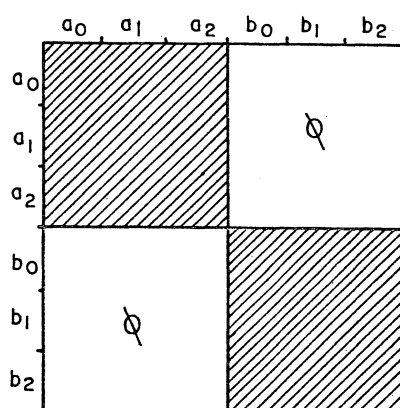


Figura 4.2.1.2. - Padrão da matriz N para polinômio do primeiro grau utilizando-se pontos de controle.

Vetor X

O vetor X ou vetor das correções é calculado através da seguinte expressão:

$$X_i = - N_i^{-1} \cdot U_i \quad (4.2.1.6.)$$

Vetor X_a

O vetor X_a ou vetor dos parâmetros ajustados é apresentado pela seguinte expressão:

$$X_{ai} = X_o + X_i \quad (4.2.1.7)$$

Trata-se da soma entre o vetor dos parâmetros aproximados (X_o(u)) e o vetor das correções (X(u)).

Vetor U

O vetor U ou vetor dos resíduos é dado pela seguinte expressão:

$$U_i = A_i \cdot X_i + L_i \quad (4.2.1.8)$$

Vetor L_a

O vetor L_a ou vetor das observações ajustadas é representado pela seguinte expressão:

$$L_{ai} = L_b + U_i \quad (4.2.1.9)$$

4.2.2. Ajustamento de Observações Aplicado a Equação Projetiva

Modelo Matemático

O modelo matemático para a Equação Projetiva utilizando-se Pontos de Controle é apresentado pela expressão (4.1.2.1).

Matriz A

A matriz A compõem-se das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros. A expressão geral da matriz A é dada pela expressão (4.2.1.1).

A seguir apresenta-se as derivadas parciais da matriz A em relação aos parâmetros:

$$dF_X / da_1 = x / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

$$dF_X / da_2 = y / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

$$dF_X / da_3 = 1 / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

$$dF_X / da_4 = -x \cdot (a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)^2$$

$$dF_X / da_5 = -y \cdot (a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)^2$$

$$dF_X / da_6 = 0$$

$$dF_X / da_7 = 0$$

$$dF_X / da_8 = 0$$

$$dF_Y / da_1 = 0$$

$$dF_Y / da_2 = 0$$

$$dF_Y / da_3 = 0$$

$$dF_Y / da_4 = -x \cdot (a_6 \cdot x + a_7 \cdot y + a_8) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)^2$$

$$dF_Y / da_5 = -y \cdot (a_6 \cdot x + a_7 \cdot y + a_8) / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)^2$$

$$dF_Y / da_6 = x / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

$$dF_Y / da_7 = y / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

$$dF_Y / da_8 = 1 / (a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + 1)$$

O Padrão da matriz A para a Equação Projetiva aplicada a pontos de controle é dado pela Figura 4.2.2.1.

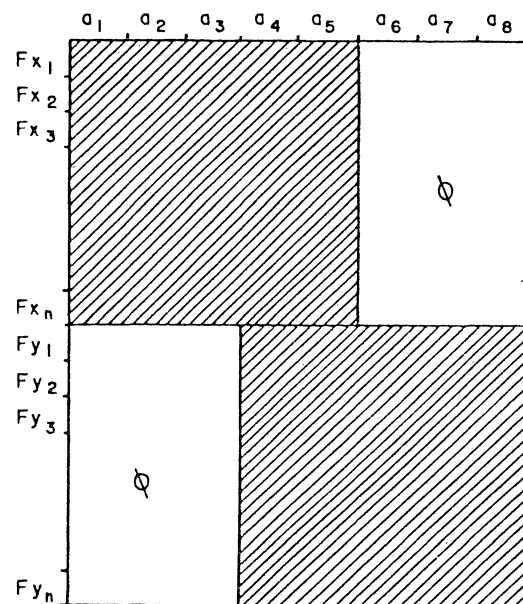


Figura 4.2.2.1 - Padrão da matriz A para a Equação Projetiva utilizando pontos de controle.

Solução do Modelo Matemático pelo Método dos Mínimos Quadrados

Matriz N

A matriz N, ou matriz Normal, é dada pela expressão (4.2.1.4). O Padrão da matriz N para o caso da Equação Projetiva é apresentado na figura 4.2.2.2.

Observação : Os demais vetores e matrizes apresentam-se

de maneira similar a apresentada no item 4.2.1.

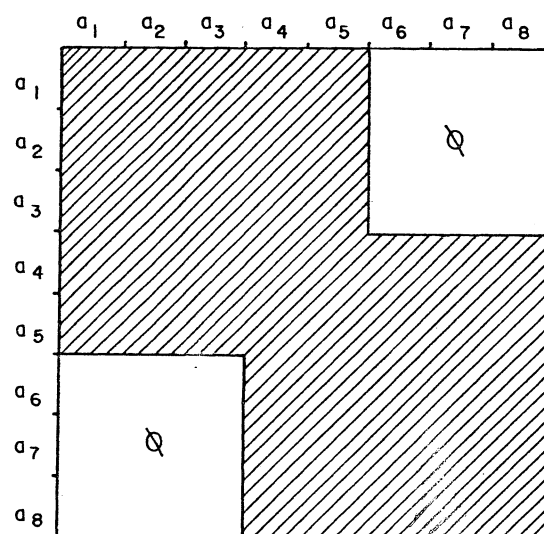


Figura 4.2.2.2 - Padrão da matriz N para a Equação
Projetiva utilizando pontos de controle.

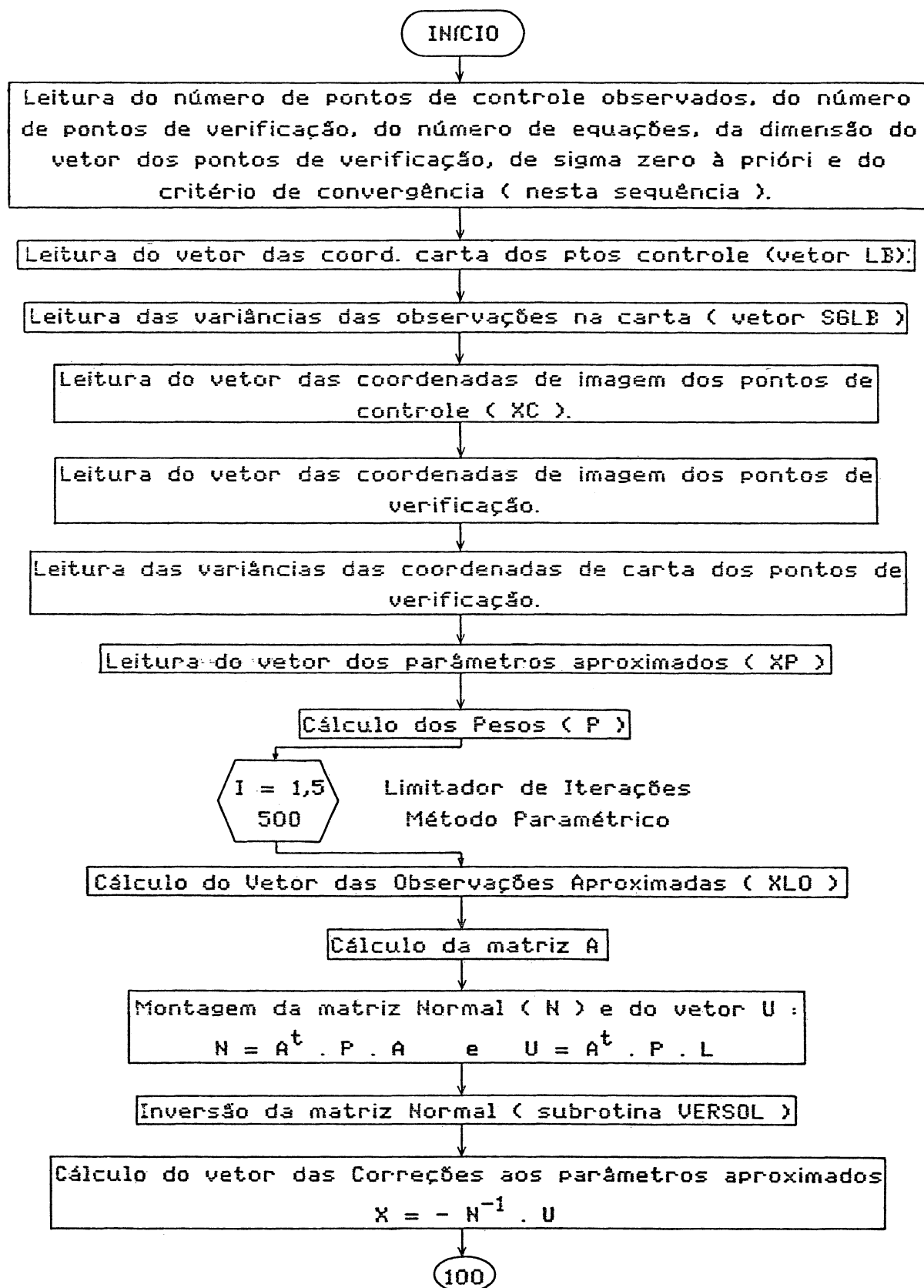
4.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

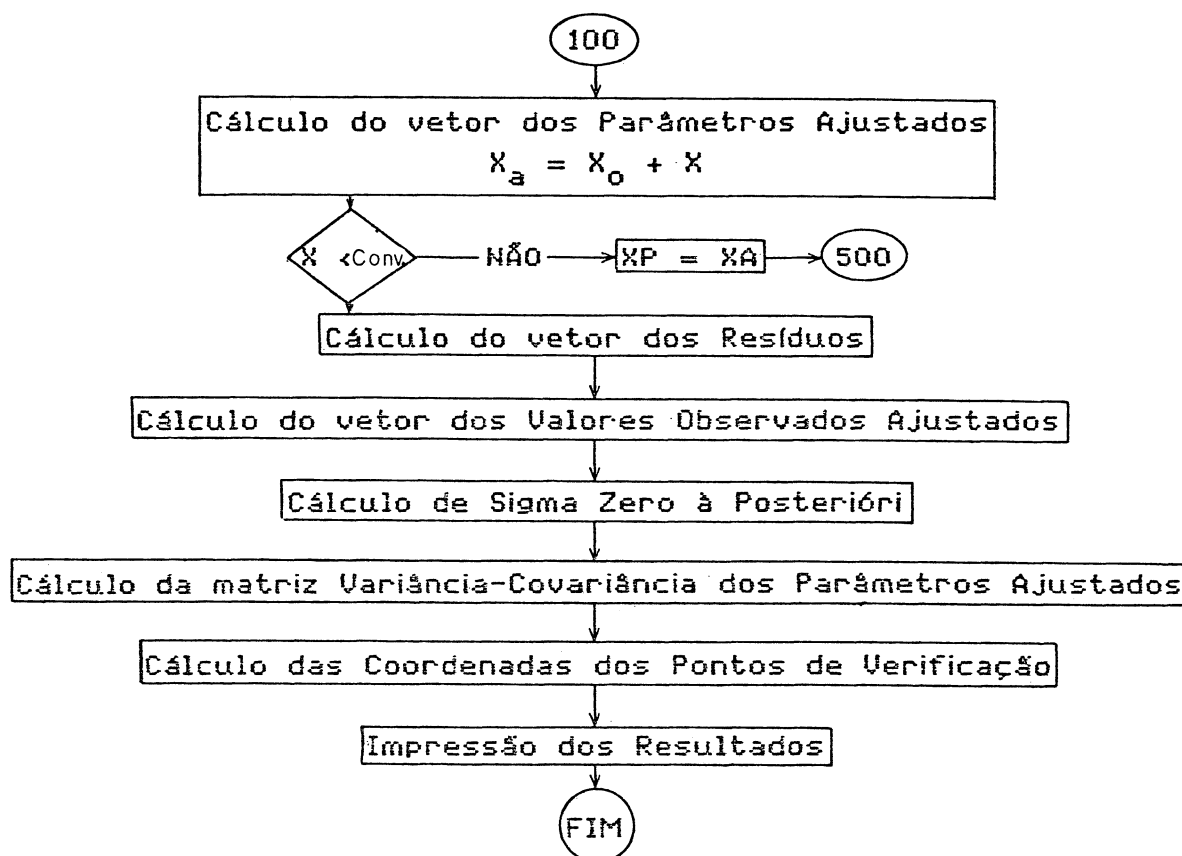
Visando a realização dos testes dos modelos matemáticos propostos no item 4.1., desenvolvidos e adaptados para o Ajustamento de Observações pelo Método Paramétrico e já apresentados no item 4.2., elaborou-se os programas computacionais fazendo uso da linguagem BASIC com execução através do TURBO-BASIC, implementado no computador ITAUTEC PCXTII.

4.3.1. Fluxograma

Apresenta-se neste item o fluxograma desenvolvido para o Modelo Polinomial e para a Equação Projetiva utilizando-se o

Ajustamento pelo Método Paramétrico.

FLUXOGRAMA



4.3.2. Critério de Convergência

Aplica-se o Critério de Convergência para verificar se todos os elementos do vetor das Correções (vetor X) estão com seus valores dentro do limite mínimo estipulado. Nos testes deste trabalho adotou-se o limite de convergência de 0,01 m para as correções dos parâmetros. Considerando-se a escala da imagem (1:1.000.000) e a escala da carta (1:50.000), entendeu-se que o critério de convergência de 1 cm para os parâmetros ajustados seria mais que suficiente para garantir os bons resultados dos testes. Deve-se lembrar que a precisão adotada para as leituras nas cartas topográficas equivale a 12,5 m no terreno (0,25 mm na escala da carta). No caso da imagem de satélite, a leitura no monocomparador apresenta precisão de 2 m no terreno.

Caso existam valores maiores que o estipulado, novas

iterações deverão ser feitas até que a convergência seja atingida. Quando os valores dos elementos do vetor das Correções encontram-se dentro do limite pré-estipulado, procede-se o cálculo da Variância da Unidade de Peso à Posteriori e da matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados. Calcula-se também os valores das Coordenadas de Terreno para os pontos e/ou feições de verificação.

CAPÍTULO V

5. MODELOS MATEMÁTICOS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES PARA FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

No capítulo II, item 2.2., descreveu-se o conceito de feição, suas características, particularidades e principais aplicações. Sabendo-se da alternativa do uso de feições conjuntamente ou em substituição a pontos de controle, serão apresentados nesta etapa os modelos matemáticos de interesse adaptados à feições retas.

A Figura 5.1 ilustra um segmento de reta \overline{AB} referente a um sistema de coordenadas (X,Y) qualquer.

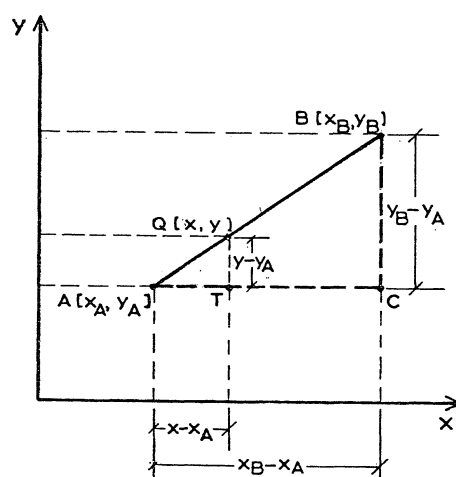


Fig. 5.1 - Representação gráfica do segmento de reta \overline{AB} referente ao Sistema de Coordenadas (X,Y) .

Os extremos do segmento de reta \overline{AB} apresentado na Figura 5.1 possuem coordenadas (x_A, y_A) e (x_B, y_B) respectivamente. Neste segmento de reta escolheu-se um ponto "Q" qualquer, de

coordenadas (X,Y) , que subdivide o segmento de reta \overline{AB} em \overline{AQ} e \overline{QB} . Conforme apresenta a Figura 5.1, pode-se trabalhar com dois triângulos semelhantes, ou seja, os triângulos $B\hat{A}C$ e $Q\hat{A}T$. Assim tem-se:

$$(Y_B - Y_A)/(X_B - X_A) = (Y - Y_A)/(X - X_A) = t \quad (5.1)$$

Sendo t o parâmetro do segmento de reta ou a tangente do ângulo formado pelo segmento de reta \overline{AB} e sua projeção sobre AC .

Pode-se considerar que o segmento de reta em questão nada mais é do que uma feição reta referente à um sistema de coordenadas (X, Y) , cujos extremos são conhecidos. Tem-se portanto os valores das coordenadas de carta (X_A, Y_A) e (X_B, Y_B) . Através da equação da reta em função das coordenadas extremas e do parâmetro da reta (t) pode-se expressar as coordenadas (X, Y) de um ponto qualquer 'Q' sobre a feição, ou seja:

$$X = X_A + t.(X_B - X_A) \quad (5.2)$$

$$Y = Y_A + t.(Y_B - Y_A) \quad (5.3)$$

Esta relação matemática apresenta as coordenadas de um ponto qualquer sobre a feição reta como função dos extremos desta feição e do parâmetro da reta.

A equação reduzida da reta é dada por :

$$y = c_1.x + c_2 \quad (5.4)$$

E, de (5.2) tem-se :

$$t = (X - X_A)/(X_B - X_A) \quad (5.5)$$

Para se determinar os valores de c_1 e c_2 em função dos

pontos extremos do segmento de reta, inicialmente substitui-se (5.5) em (5.3), obtendo-se :

$$Y = Y_A + (X - X_A) \cdot (Y_B - Y_A) / (X_B - X_A) \quad (5.6)$$

Efetuada-se algumas operações algébricas chega-se à :

$$Y = ((Y_B - Y_A) / (X_B - X_A)) \cdot X + (X_B \cdot Y_A - X_A \cdot Y_B) / (X_B - X_A) \quad (5.7)$$

Comparando-se com a equação reduzida da reta apresentada em (5.4) tem-se:

$$c_1 = (Y_B - Y_A) / (X_B - X_A) \quad (5.8)$$

$$e \quad c_2 = (X_B \cdot Y_A - X_A \cdot Y_B) / (X_B - X_A) \quad (5.9)$$

Estas expressões representam as constantes da equação reduzida da reta para cada feição reta em estudo.

5.1. MODELOS MATEMÁTICOS

5.1.1. Polinômio do Primeiro Grau Adaptado a Feições Retas

$$\begin{aligned} F_X &\Rightarrow a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y - (X_A + t \cdot (X_B - X_A)) = 0 \\ F_Y &\Rightarrow b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y - (Y_A + t \cdot (Y_B - Y_A)) = 0 \end{aligned} \quad (5.1.1.1)$$

Onde:

F : representa a função;

a_i e b_i com $i = 0 \dots 2$: representam os parâmetros da transformação;

(x , y) : representam as coordenadas de um ponto qualquer da feição, obtidas do monocomparador;

(X_A, Y_A) e (X_B, Y_B) : representam as coordenadas dos pontos extremos A e B da feição reta, respectivamente;
 t : parâmetro da reta.

5.1.2. Polinômio do Segundo Grau Adaptado a Feições Retas

$$\begin{aligned}
 F_X &\Rightarrow a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x \cdot y + a_5 \cdot y^2 \\
 &\quad - (X_A + t \cdot (X_B - X_A)) = 0 \\
 F_Y &\Rightarrow b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x \cdot y + b_5 \cdot y^2 \\
 &\quad - (Y_A + t \cdot (Y_B - Y_A)) = 0
 \end{aligned} \tag{5.1.2.1}$$

Sendo :

a_i e b_i com $i = 0, \dots, 5$, que representam os parâmetros da transformação.

Os demais elementos equivalem aos apresentados no item 5.1.1.

5.1.3. Polinômio do Terceiro Grau Adaptado a Feições Retas

$$\begin{aligned}
 F_X &\Rightarrow a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x \cdot y + a_5 \cdot y^2 + a_6 \cdot x^3 + \\
 &\quad a_7 \cdot x^2 \cdot y + a_8 \cdot x \cdot y^2 + a_9 \cdot y^3 - (X_A + t \cdot (X_B - X_A)) = 0 \\
 F_Y &\Rightarrow b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x \cdot y + b_5 \cdot y^2 + b_6 \cdot x^3 + \\
 &\quad b_7 \cdot x^2 \cdot y + b_8 \cdot x \cdot y^2 + b_9 \cdot y^3 - (Y_A + t \cdot (Y_B - Y_A)) = 0
 \end{aligned} \tag{5.1.3.1}$$

Sendo:

a_i e b_i , com $i = 0 \dots 9$, que representam os parâmetros da transformação.

5.1.4. Equação Projetiva Adaptada a Feições Retas

$$\begin{aligned}
 F_X &\Rightarrow ((a_1.x + a_2.y + a_3)/(a_4.x + a_5.y + 1)) \\
 &\quad - (X_A + t.(X_B - X_A)) = 0 \\
 F_Y &\Rightarrow ((a_6.x + a_7.y + a_8)/(a_4.x + a_5.y + 1)) \\
 &\quad - (Y_A + t.(Y_B - Y_A)) = 0
 \end{aligned} \tag{5.1.4.1}$$

Onde:

a_i , com $i = 1 \dots 8$, são os parâmetros da transformação.

5.2. AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

Observa-se que os modelos matemáticos apresentados no item 5.1. apresentam parâmetros incógnitos (a_i , b_i e t) e quantidades observadas (x , y , X_A , Y_A , X_B , Y_B), numa mesma expressão, o que caracteriza a necessidade de ajustamento pelo *Método Combinado*.

O Ajustamento de Observações pelo Método Combinado será adotado neste trabalho de forma iterativa, através do modelo desenvolvido por POPE em 1151.

O modelo matemático geral para este tipo de ajustamento é dado por:

$$F(X_{a_i}, L_{a_i}) = 0$$

Onde :

$X_{a_i} = X_{a_{i-1}} + X_i$, sendo X_{a_i} o vetor dos parâmetros ajustados com dimensão $X_a(u)$.

$L_{a_i} = L_b + U_i$, sendo L_{a_i} o vetor das observações ajustadas, com dimensão $L_a(n)$.

Através da linearização pela série de Taylor (descrita em [103], [114] e [161]), obtém-se o modelo linearizado, aqui apresentado já na forma matricial:

$$A_i X_i + B_i U_i + W_i = 0$$

Onde:

$$A_i = \left. \partial F / \partial X_{ai} \right|_{X_{ai} = X_{ai-1}}$$

A_i é denominada matriz das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros incógnitos e apresenta dimensão de $A(n,u)$

$$B_i = \left. \partial F / \partial L_{ai} \right|_{L_{ai} = L_{ai-1}}$$

B_i é denominada matriz das derivadas parciais da função em relação as observações e apresenta dimensão $B(n,r)$

$$W_i = F(X_{ai-1}, L_{ai-1}) - B_i \cdot U_{i-1}$$

W_i é denominado vetor dos erros de fechamento que apresenta dimensão $W(n)$

$$U_{i-1} = L_{ai-1} - L_b$$

$$X_i = - (A_i^t \cdot C_i^{-1} \cdot A_i)^{-1} \cdot (A_i \cdot C_i^{-1} \cdot W_i)$$

$$\text{com } C_i = B_i \cdot P^{-1} \cdot B_i^t$$

X_i é denominado vetor das correções, com dimensão $X(u)$

$$K_i = - C_i^{-1} \cdot (A_i \cdot X_i \cdot W_i)$$

K_i é denominado vetor dos correlatos ou vetor dos lagrangianos, com dimensão $K(n)$

$$V_i = P^{-1} \cdot B_i^t \cdot K_i$$

V_i é denominado vetor dos resíduos, com dimensão $V(n)$

E sendo:

n : Número de Equações;

u : Número de Parâmetros;

r : Número de Observações.

A Matriz Variância-Covariância (MVC) dos Parâmetros Ajustados apresenta-se como :

$$MVC \hat{X}_{a_i} = Var_{post} \cdot (A_i^t \cdot C_i^{-1} \cdot A_i)^{-1}.$$

Esta Matriz apresenta como dimensão $MVC \hat{X}_{a_i} (u,u)$.

O índice "i" que aparece nas expressões deste texto indica o processo iterativo de ajustamento, representando a "i-ésima" iteração.

A matriz dos pesos, a variância da unidade de peso a posteriori e os graus de liberdade apresentam-se no Capítulo IV, item 4.2.

5.2.1. Ajustamento Aplicado ao Polinômio do Primeiro Grau

Adaptado a Feições Retas

Modelo Matemático

O modelo matemático para Polinômio do Primeiro Grau utilizando-se feições retas em substituição a pontos de controle é dado pela expressão (5.1.1.1).

Matriz B

A Matriz B é composta das derivadas parciais da função em relação às observações. Neste trabalho são consideradas

observações as coordenadas de monocomparador (x,y) para cada feição de interesse e as coordenadas de terreno, extraídas das cartas topográficas.

A expressão geral da Matriz B é dada por:

$$B_i = \partial F / \partial L_{a_i} \mid L_{a_i} = L_{a_i-1} \quad (5.2.1.1)$$

A seguir, apresentam-se as derivadas parciais que compõem a Matriz B:

$$\partial F_X / \partial x = a_1 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial x = b_1$$

$$\partial F_X / \partial y = a_2 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial y = b_2$$

$$\partial F_X / \partial X_A = t-1 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial X_A = 0$$

$$\partial F_X / \partial Y_A = 0 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial Y_A = t-1$$

$$\partial F_X / \partial X_B = -t \quad ; \quad \partial F_Y / \partial X_B = 0$$

$$\partial F_X / \partial Y_B = 0 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial Y_B = -t.$$

A matriz B apresenta o seguinte padrão :

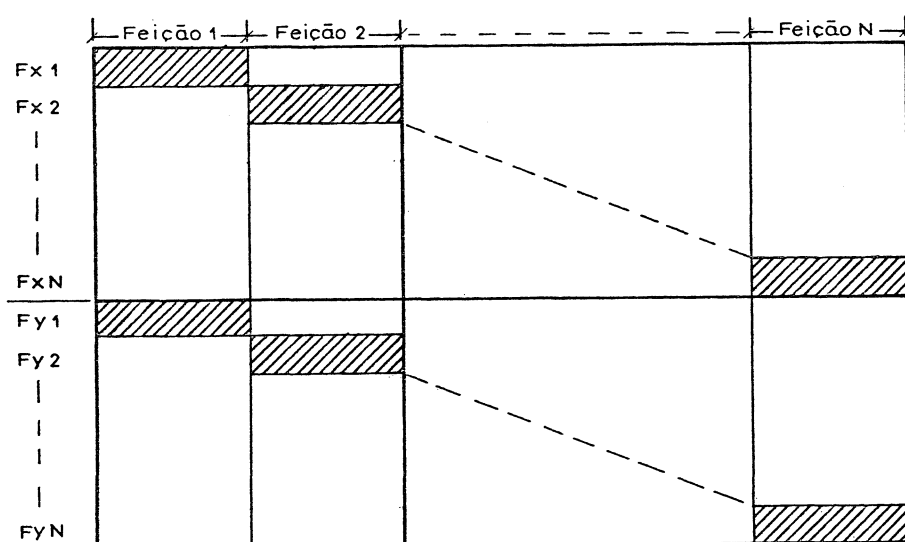


Figura 5.2.1.1 - Padrão da matriz B para o polinômio de primeiro grau adaptado a feições retas

Matriz A

A Matriz A compõem-se das derivadas parciais da Função em relação aos parâmetros. São considerados "parâmetros do ajustamento" aqueles correspondentes aos modelos de transformação associados aos da equação da reta.

A expressão geral da Matriz A é dada por:

$$A_i = \partial F / \partial X_{ai} \quad X_{ai} = X_{ai-1} \quad (5.2.1.2)$$

A seguir apresenta-se as derivadas parciais da matriz A em relação aos "parâmetros do ajustamento":

$$\partial F_X / \partial a_0 = 1 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial a_0 = 0$$

$$\partial F_X / \partial a_1 = x \quad ; \quad \partial F_Y / \partial a_1 = 0$$

$$\partial F_X / \partial a_2 = y \quad ; \quad \partial F_Y / \partial a_2 = 0$$

$$\partial F_X / \partial b_0 = 0 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial b_0 = 1$$

$$\partial F_X / \partial b_1 = 0 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial b_1 = x$$

$$\partial F_X / \partial b_2 = 0 \quad ; \quad \partial F_Y / \partial b_2 = y$$

$$\partial F_X / \partial t = X_A - X_B \quad ; \quad \partial F_Y / \partial t = Y_A - Y_B$$

A Matriz A apresenta-se com o seguinte padrão:

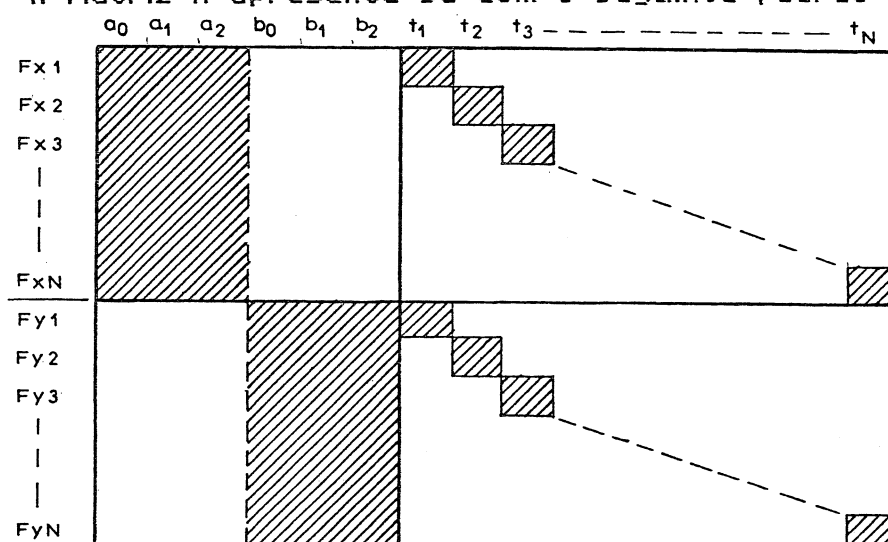


Figura 5.2.1.2 - Padrão da matriz A para o polinômio de primeiro grau adaptado a feições retas

Matriz P

A Matriz P apresenta-se semelhantemente à definida no item 4.2. do Capítulo IV.

Vetor W

O Vetor W é denominado Vetor dos Erros de Fechamento. A expressão geral do vetor W é dada por :

$$W_i = F(X_{a_{i-1}}, L_{a_{i-1}}) - B_i \cdot U_{i-1} \quad (5.2.1.3)$$

O vetor W apresenta para cada feição duas expressões, uma para o componente X e outra para o componente Y, na forma:

$$\begin{aligned} W_X &= a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y - (X_A + t \cdot (X_B - X_A)) - B_i \cdot U_{i-1} \\ W_Y &= b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y - (Y_A + t \cdot (Y_B - Y_A)) - B_i \cdot U_{i-1} \end{aligned} \quad (5.2.1.4)$$

Onde os parâmetros aproximados e as observações são os valores do ponto de expansão da série para o caso da primeira iteração; ou os parâmetros e observações ajustados da iteração anterior, no caso da segunda iteração e das iterações superiores.

Solução do Modelo Matemático pelo Método dos Mínimos Quadrados

Matriz C

A expressão geral da Matriz C é dada por :

$$C_i = B_i \cdot P^{-1} \cdot B_i^t \quad (5.2.1.5)$$

Observa-se que esta matriz resulta da multiplicação das matrizes já obtidas anteriormente.

Matriz C-Inversa

Para calcular a Matriz C-Inversa utilizou-se o programa VERSOL adaptado à linguagem BASIC e específico para inversão de matrizes.

Matriz N

A matriz N, ou matriz Normal, é dada pela expressão:

$$N_i = A_i^t \cdot C_i^{-1} \cdot A_i \quad (5.2.1.6)$$

O padrão da matriz N para o caso do Modelo Polinomial é apresentado na Figura 5.2.1.3.

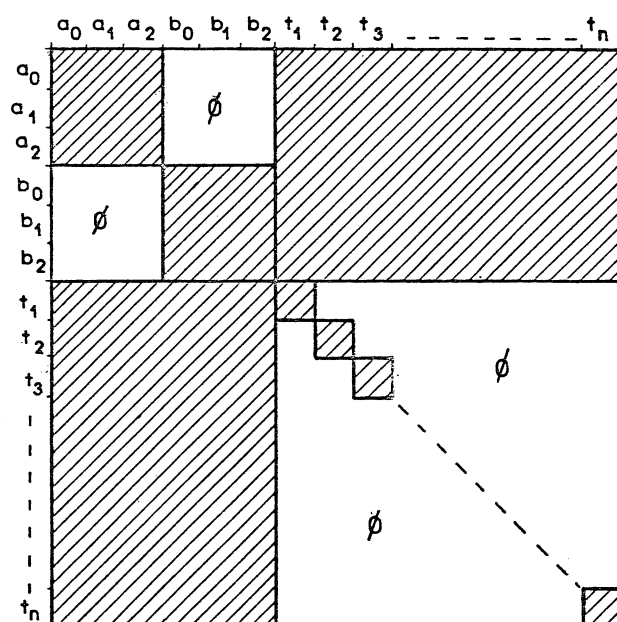


Figura 5.2.1.3 - Padrão da Matriz N para o polinômio de primeiro grau adaptado a feições retas.

Vetor U

O vetor U representa a seguinte multiplicação matricial:

$$U_i = A_i^t \cdot C_i^{-1} \cdot W_i \quad (5.2.1.7.)$$

Matriz N-Inversa

A matriz N-Inversa é calculada através do Programa VERSOL, específico para inversão de matrizes, adaptado à linguagem BASIC.

Vetor das Correções (X)

O vetor das correções é dado pela seguinte expressão:

$$X_i = - N_i^{-1} \cdot U_i \quad (5.2.1.7)$$

Vetor dos Correlatos (k)

O vetor dos Correlatos é dado pela seguinte expressão:

$$k_i = - C_i^{-1} \cdot (A_i X_i + W_i) \quad (5.2.1.8)$$

Vetor dos Resíduos (U)

O vetor dos Resíduos é dado pela seguinte expressão:

$$U_i = P^{-1} \cdot B_i^t \cdot k_i \quad (5.2.1.9)$$

Vetor dos Parâmetros Ajustados (X_{a_i})

O vetor dos Parâmetros Ajustados é dado pela seguinte expressão:

$$X_{a_i} = X_0 + X_i \quad (5.2.1.10)$$

Vetor das Observações Ajustadas (L_{a_i})

O vetor das Observações Ajustadas é dado pela seguinte expressão:

$$L_{a_i} = L_{a_{i-1}} + U_i \quad (5.2.1.11)$$

5.2.2. Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Segundo Grau Adaptado a Feições Retas

Modelo Matemático

O modelo matemático para o Polinômio de Segundo Grau Modificado é apresentado pela expressão (5.1.2.1).

Apresenta-se, a seguir, a descrição das matrizes e dos vetores principais.

Matriz B

A Matriz B é composta das derivadas parciais da função em relação às observações. As coordenadas obtidas do monocomparador para cada feição de interesse, juntamente com as coordenadas de terreno, extraídas das cartas topográficas, são consideradas observações.

A expressão geral para a Matriz B é dada pela expressão (5.2.1.1).

Apresenta-se, na sequência, as derivadas parciais da função, com respeito as observações:

$$\partial F_X / \partial x = a_1 + 2.a_3.x + a_4.y ;$$

$$\partial F_X / \partial y = a_2 + a_4.x + 2.a_5.y ;$$

$$\partial F_X / \partial X_A = t - 1 ;$$

$$\partial F_X / \partial Y_A = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial X_B = -t ;$$

$$\partial F_X / \partial Y_B = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial x = b_1 + 2.b_3.x + b_4.y ;$$

$$\partial F_Y / \partial y = b_2 + b_4.x + 2.b_5.y ;$$

$$\partial F_Y / \partial X_A = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial Y_A = t-1 ;$$

$$\partial F_Y / \partial X_B = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial Y_B = -t.$$

Quanto ao padrão da Matriz B, este aparece semelhante ao apresentado para o Polinômio do Primeiro Grau pela Figura 5.2.1.1.

Matriz A

A Matriz A compõem-se das derivadas parciais da função em relação aos " parâmetros de ajustamento ".

A expressão geral da Matriz A é dada pela expressão (5.2.1.2)

Apresentam-se a seguir, as derivadas parciais que compõem a Matriz A, relativas a X e Y respectivamente:

$$\partial F_X / \partial a_0 = 1 ; \quad \partial F_Y / \partial a_0 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_1 = x ; \quad \partial F_Y / \partial a_1 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_2 = y ; \quad \partial F_Y / \partial a_2 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_3 = x^2 ; \quad \partial F_Y / \partial a_3 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_4 = x.y ; \quad \partial F_Y / \partial a_4 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_5 = y^2 ; \quad \partial F_Y / \partial a_5 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial b_0 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_0 = 1 ;$$

$$\partial F_X / \partial b_1 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_1 = x ;$$

$$\partial F_X / \partial b_2 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_2 = y ;$$

$$\partial F_X / \partial b_3 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_3 = x^2 ;$$

$$\partial F_X / \partial b_4 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_4 = x.y ;$$

$$\partial F_X / \partial b_5 = 0 ; \quad \partial F_Y / \partial b_5 = y^2 ;$$

$$\partial F_X / \partial t = X_A - X_B ; \quad \partial F_Y / \partial t = Y_A - Y_B .$$

Quanto ao padrão da Matriz A, este aparece da mesma forma apresentada pela Figura 5.2.1.2, para Polinômio de Primeiro Grau.

Matriz P

A Matriz P apresenta-se semelhantemente ao definido no item 4.2. do Capítulo IV.

Vetor W

O Vetor W ou Vetor dos Erros de Fechamento apresenta-se conforme a expressão (5.2.1.3).

O Vetor W apresenta para cada feição uma expressão para o componente X e outra para o componente Y, na forma:

$$W_X = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.x.y + a_5.y^2 \\ - (X_A + t.(X_B - X_A)) - B_i . U_{i-1}$$

$$W_Y = b_0 + b_1.x + b_2.y + b_3.x^2 + b_4.x.y + b_5.y^2 \\ - (Y_A + t.(X_B - X_A)) - B_i . U_{i-1}$$

Onde os parâmetros aproximados e as observações estimadas são os valores do ponto de expansão da série para o caso da primeira iteração; ou os parâmetros e observações ajustados da iteração anterior, no caso da segunda iteração e das iterações superiores.

Observação : Os itens subsequentes apresentam-se de forma semelhante ao apresentado no item 5.2.1.

5.2.3. Ajustamento Aplicado ao Polinômio de Terceiro Grau

Adaptado a Feições Retas

Modelo Matemático

O Modelo Matemático para o Polinômio de Terceiro Grau adaptado a feições retas apresenta-se conforme a expressão (5.1.3.1).

Segue-se a descrição das principais matrizes e dos principais vetores.

Matriz B

A Matriz B é composta das derivadas parciais da função em relação às observações. As coordenadas obtidas do monocomparador para cada feição de interesse juntamente com as coordenadas de terreno, extraídas das cartas topográficas, são consideradas observações.

A expressão geral da Matriz B é dada pela expressão (5.2.1.1).

$$\partial F_X / \partial x = a_1 + 2.a_3.x + a_4.y + 3.a_6.x^2 + 2.a_7.x.y + a_8.y^2 ;$$

$$\partial F_X / \partial y = a_2 + a_4.x + 2.a_5.y + a_7.x^2 + 2.a_8.x.y + 3.a_9.y^2 ;$$

$$\partial F_X / \partial X_A = t - 1 ;$$

$$\partial F_X / \partial Y_A = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial X_B = -t ;$$

$$\partial F_X / \partial Y_B = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial x = b_1 + 2.b_3.x + b_4.y + 3.b_6.x^2 + 2.b_7.x.y + b_8.y^2 ;$$

$$\partial F_Y / \partial y = b_2 + b_4.x + 2.b_5.y + b_7.x^2 + 2.b_8.x.y + 3.b_9.y^2 ;$$

$$\partial F_Y / \partial X_A = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial Y_A = t - 1 ;$$

$$\partial F_Y / \partial X_B = 0 ;$$

$$\partial F_Y / \partial Y_B = -t .$$

O Padrão da Matriz B aparece para o Polinômio de Terceiro Grau de forma semelhante ao apresentado pela Figura 5.2.1.1.

Matriz A

A Matriz A compõem-se das derivadas parciais da função em relação aos " parâmetros de ajustamento ". A expressão geral da Matriz A é dada pela expressão (5.2.1.2).

Apresenta-se a seguir, as derivadas parciais que compõem a Matriz A:

$$\partial F_X / \partial a_0 = 1 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_0 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_1 = x ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_1 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_2 = y ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_2 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_3 = x^2 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_3 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_4 = x.y ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_4 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_5 = y^2 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_5 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_6 = x^3 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_6 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_7 = x^2.y ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_7 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_8 = x.y^2 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_8 = 0 ;$$

$$\partial F_X / \partial a_9 = y^3 ;$$

$$\partial F_Y / \partial a_9 = 0 ;$$

$$\begin{array}{ll}
dF_X / db_0 = 0 ; & dF_Y / db_0 = 1 ; \\
dF_X / db_1 = 0 ; & dF_Y / db_1 = x ; \\
dF_X / db_2 = 0 ; & dF_Y / db_2 = y ; \\
dF_X / db_3 = 0 ; & dF_Y / db_3 = x^2 ; \\
dF_X / db_4 = 0 ; & dF_Y / db_4 = x.y ; \\
dF_X / db_5 = 0 ; & dF_Y / db_5 = y^2 ; \\
dF_X / db_6 = 0 ; & dF_Y / db_6 = x^3 ; \\
dF_X / db_7 = 0 ; & dF_Y / db_7 = x^2.y ; \\
dF_X / db_8 = 0 ; & dF_Y / db_8 = x.y^2 ; \\
dF_X / db_9 = 0 ; & dF_Y / db_9 = y^3 ; \\
dF_X / dt = X_A - X_B ; & dF_Y / dt = Y_A - Y_B .
\end{array}$$

O Padrão da Matriz A aparece de forma semelhante a apresentada na Figura 5.2.1.2., para o Polinômio de Primeiro Grau.

Vetor W

O Vetor W representa o Vetor dos Erros de Fechamento. A expressão geral para o vetor W é dada pela expressão (5.2.1.3).

O Vetor W apresenta para cada feição duas expressões, uma para seu componente em X e outra para seu componente em Y, na forma:

$$\begin{aligned}
W_X = & a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.x.y + a_5.y^2 + a_6.x^3 \\
& + a_7.x^2.y + a_8.x.y^2 + a_9.y^3 - (X_A + t.(X_B - X_A)) \\
& - B_i \cdot U_{i-1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_Y = & b_0 + b_1.x + b_2.y + b_3.x^2 + b_4.x.y + b_5.y^2 + b_6.x^3 \\
 & + b_7.x^2.y + b_8.x.y^2 + b_9.y^3 - (Y_A + t.(X_B - X_A)) \\
 & - B_i \cdot U_{i-1}
 \end{aligned} \tag{5.2.3.1}$$

Observação: Os itens subsequentes apresentam-se de forma semelhante ao apresentado no item 5.2.1.

5.2.4. Ajustamento Aplicado a Equação Projetiva Adaptada a Feições Retas

Modelo Matemático

O modelo matemático da Equação Projetiva Modificada é dado pela expressão (5.1.4.1).

Segue-se o desenvolvimento do Método Combinado com a montagem das principais matrizes e vetores.

Matriz B

A matriz B é composta das derivadas parciais da função em relação às observações. Considera-se observações as coordenadas obtidas de leituras no monocomparador (x , y) para cada feição de interesse e as coordenadas de terreno, extraídas das cartas topográficas. A expressão geral para a Matriz B é dada pela expressão (5.2.1.1).

A seguir apresentam-se as derivadas parciais que compõem a Matriz B :

$$\begin{aligned}
 dF_X / d x = & ((a_4.x+a_5.y+1).a_1 - (a_1.x+a_2.y+a_3).a_4) / \\
 & (a_4.x+a_5.y+1)^2 ;
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_X}{\partial y} = ((a_4.x + a_5.y + 1).a_2 - (a_1.x + a_2.y + a_3).a_4) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$\frac{\partial F_X}{\partial X_A} = t - 1 ; \quad \frac{\partial F_X}{\partial Y_A} = 0 ;$$

$$\frac{\partial F_X}{\partial X_B} = -t ; \quad \frac{\partial F_X}{\partial Y_B} = 0 ;$$

$$\frac{\partial F_Y}{\partial x} = ((a_4.x + a_5.y + 1).a_6 - (a_6.x + a_7.y + a_8).a_4) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$\frac{\partial F_Y}{\partial y} = ((a_4.x + a_5.y + 1).a_7 - (a_6.x + a_7.y + a_8).a_5) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$\frac{\partial F_Y}{\partial X_A} = 0 ; \quad \frac{\partial F_Y}{\partial Y_A} = t - 1 ;$$

$$\frac{\partial F_Y}{\partial X_B} = 0 ; \quad \frac{\partial F_Y}{\partial Y_B} = -t.$$

O padrão da matriz B é apresentado pela figura 5.2.4.1.

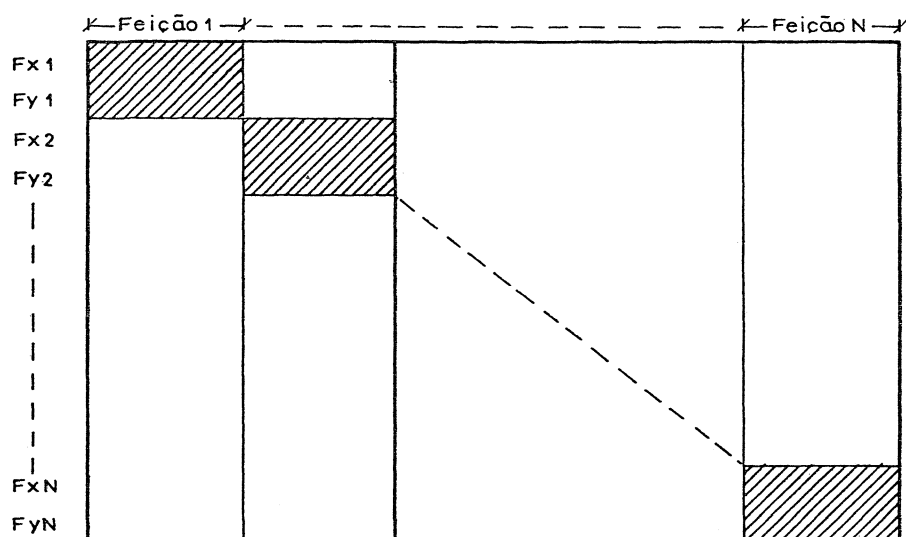


Figura 5.2.4.1. - Padrão da matriz B para a Equação Projetiva adaptada a feições retas.

Matriz A

A Matriz A compõem-se das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros do ajustamento, sendo estes considerados o conjunto de parâmetros da transformação associados aos da reta.

A expressão geral para a Matriz A é dada pela expressão (5.2.1.2).

A seguir, apresentam-se as derivadas parciais da Matriz A em relação aos *parâmetros do ajustamento*:

$$dF_X / da_1 = x / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_X / da_2 = y / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_X / da_3 = 1 / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_X / da_4 = -x.(a_1.x + a_2.y + a_3) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$dF_X / da_5 = -y.(a_1.x + a_2.y + a_3) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$dF_X / da_6 = dF_X / da_7 = dF_X / da_8 = 0 ;$$

$$dF_X / dt = X_A - X_B ;$$

$$dF_Y / da_1 = dF_Y / da_2 = dF_Y / da_3 = 0 ;$$

$$dF_Y / da_4 = -x.(a_6.x + a_7.y + a_8) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$dF_Y / da_5 = -y.(a_6.x + a_7.y + a_8) / (a_4.x + a_5.y + 1)^2 ;$$

$$dF_Y / da_6 = x / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_Y / da_7 = y / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_Y / da_8 = 1 / (a_4.x + a_5.y + 1) ;$$

$$dF_Y / dt = Y_A - Y_B .$$

A Figura 5.2.4.2. apresenta o Padrão da Matriz A.

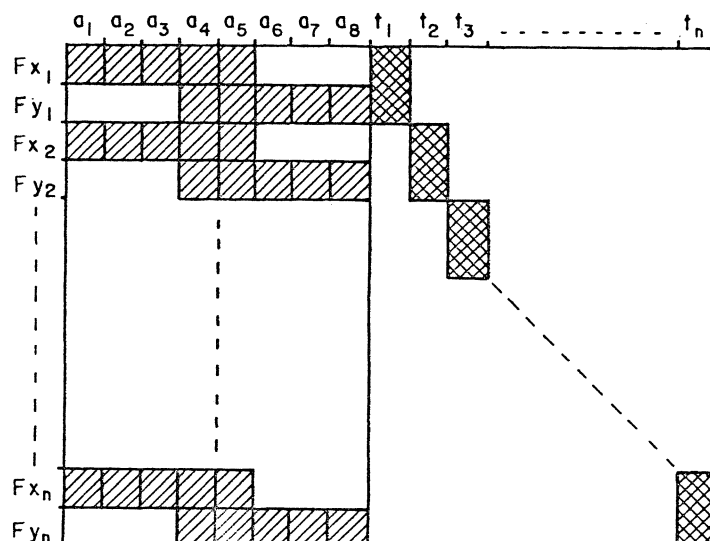


Figura 5.2.4.2 - Padrão da matriz A para a equação projetiva adaptada a feições retas.

Vetor W

O Vetor W ou Vetor dos Erros de Fechamento é apresentado pela expressão (5.2.1.3). O Vetor W apresenta para cada feição duas expressões, uma para o componente X e outra para o componente Y, na forma:

$$\begin{aligned}
 W_X &= ((a_1.x + a_2.y + a_3) / (a_4.x + a_5.y + 1)) - (X_A + t.(X_B - X_A)) \\
 &\quad - B_i \cdot U_{i-1} \\
 W_Y &= ((a_6.x + a_7.y + a_8) / (a_4.x + a_5.y + 1)) - (Y_A + t.(Y_B - Y_A)) \\
 &\quad - B_i \cdot U_{i-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.2.4.1}$$

Solução do Modelo Matemático pelo Método dos Mínimos

Quadrados

Matriz C

A expressão geral da Matriz C é dada pela expressão (5.2.1.5).

Matriz C-Inversa

Para calcular a Matriz C-Inversa utilizou-se o programa VERSOL adaptado para a linguagem BASIC, específico para inversão de matrizes.

Matriz N

A Matriz N ou matriz Normal é dada pela expressão (5.2.1.6).

O padrão da Matriz N para o caso do modelo da Equação Projetiva é apresentado na Figura 5.2.4.3.

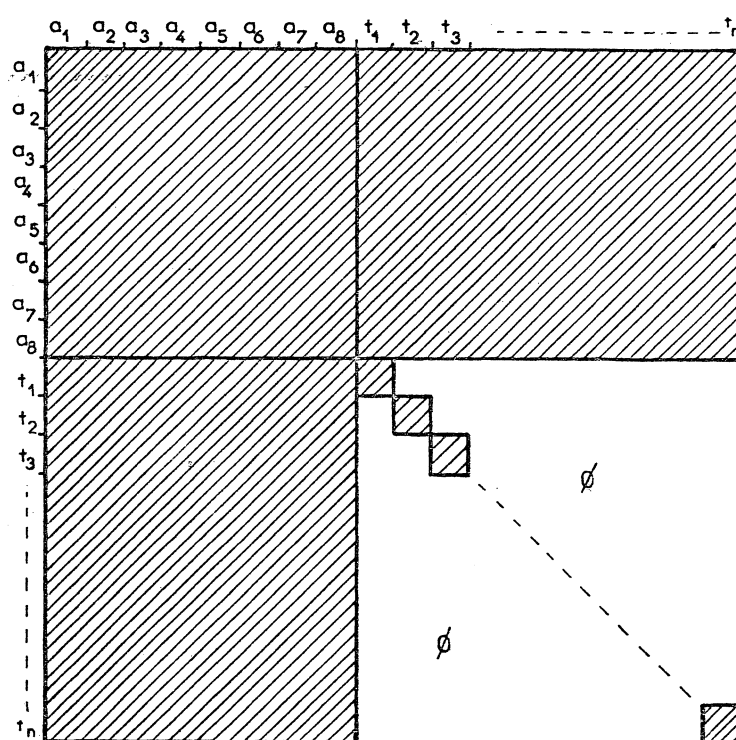


Figura 5.2.4.3 - Padrão da matriz N para a equação projetiva aplicada a feições retas.

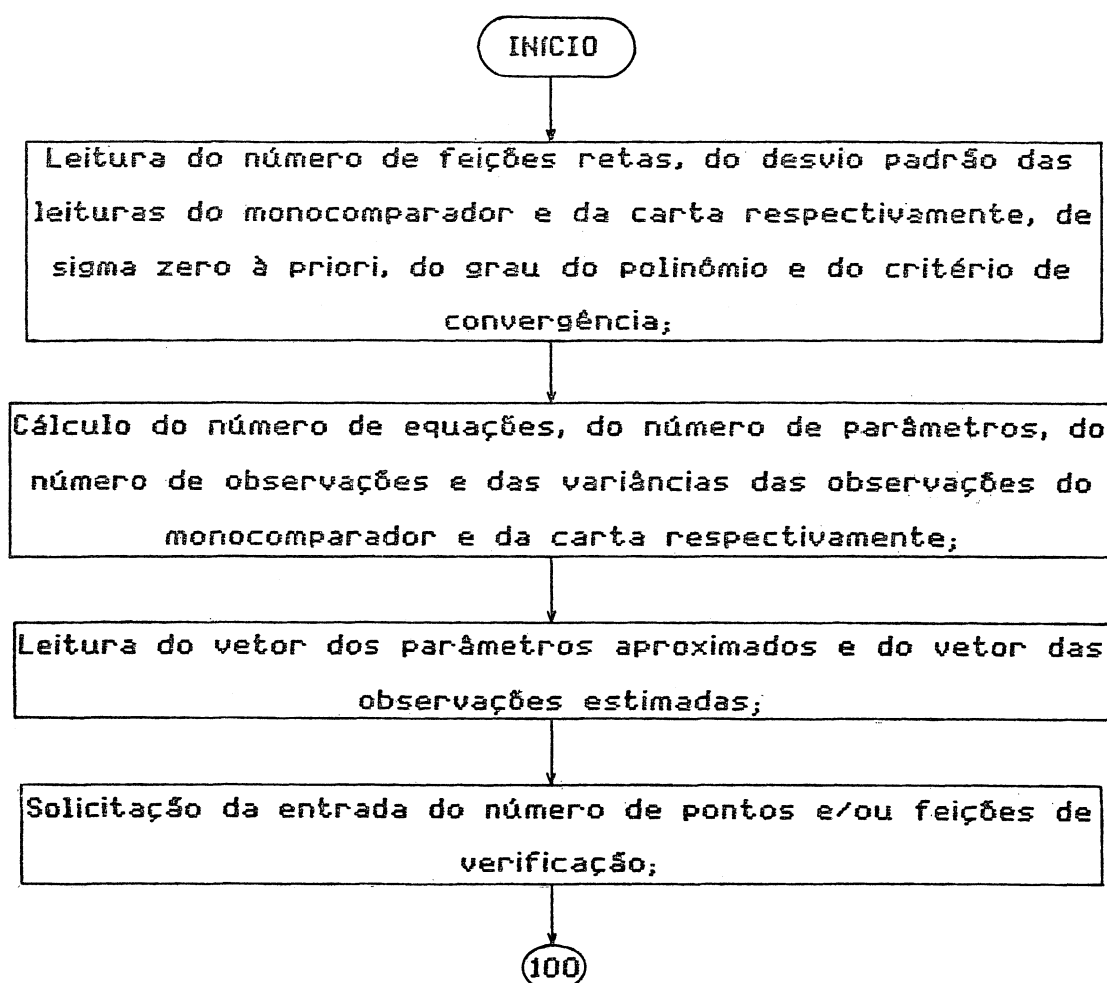
Os demais vetores e matrizes equivalem aos apresentados no item 5.2.1.

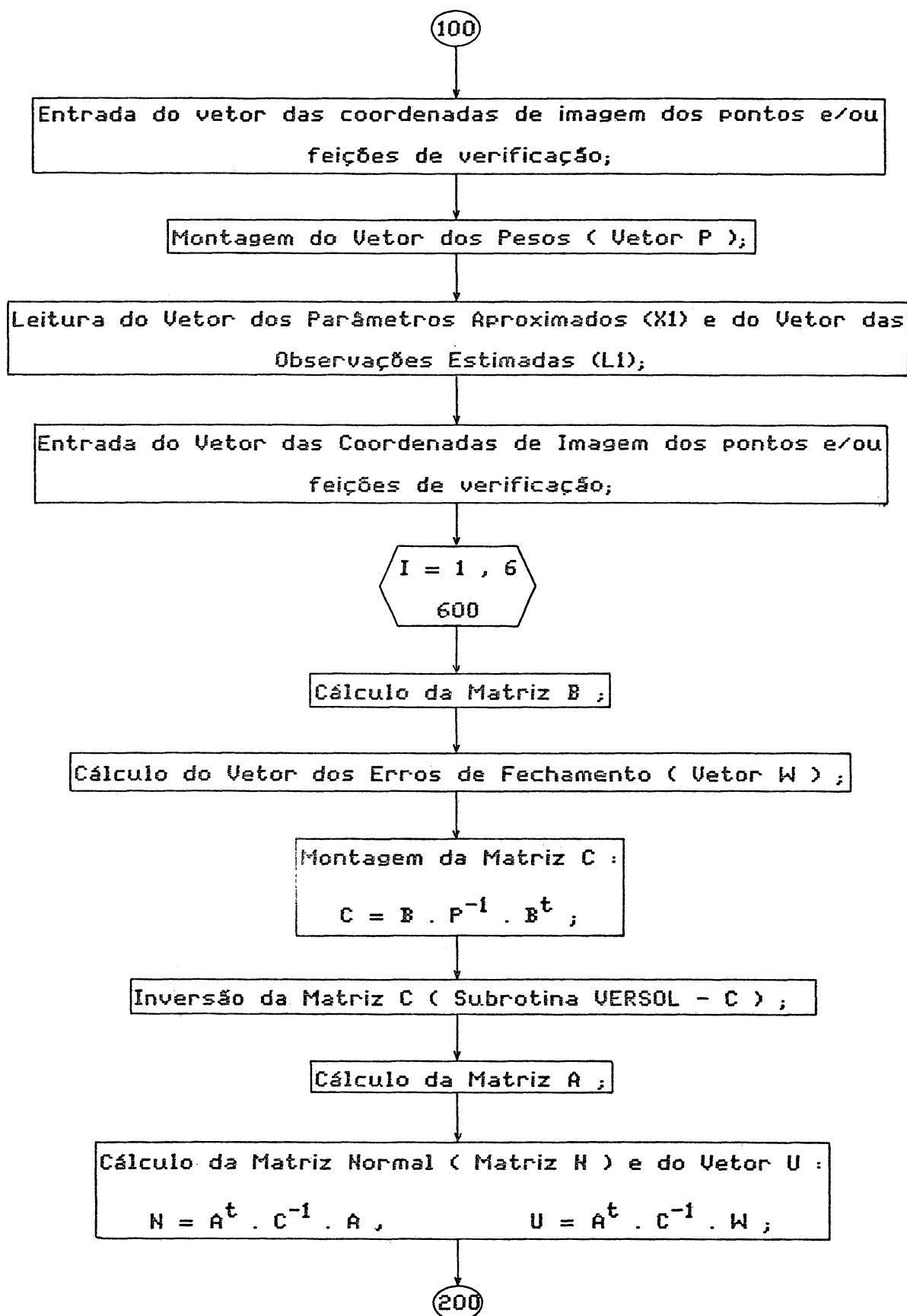
5.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

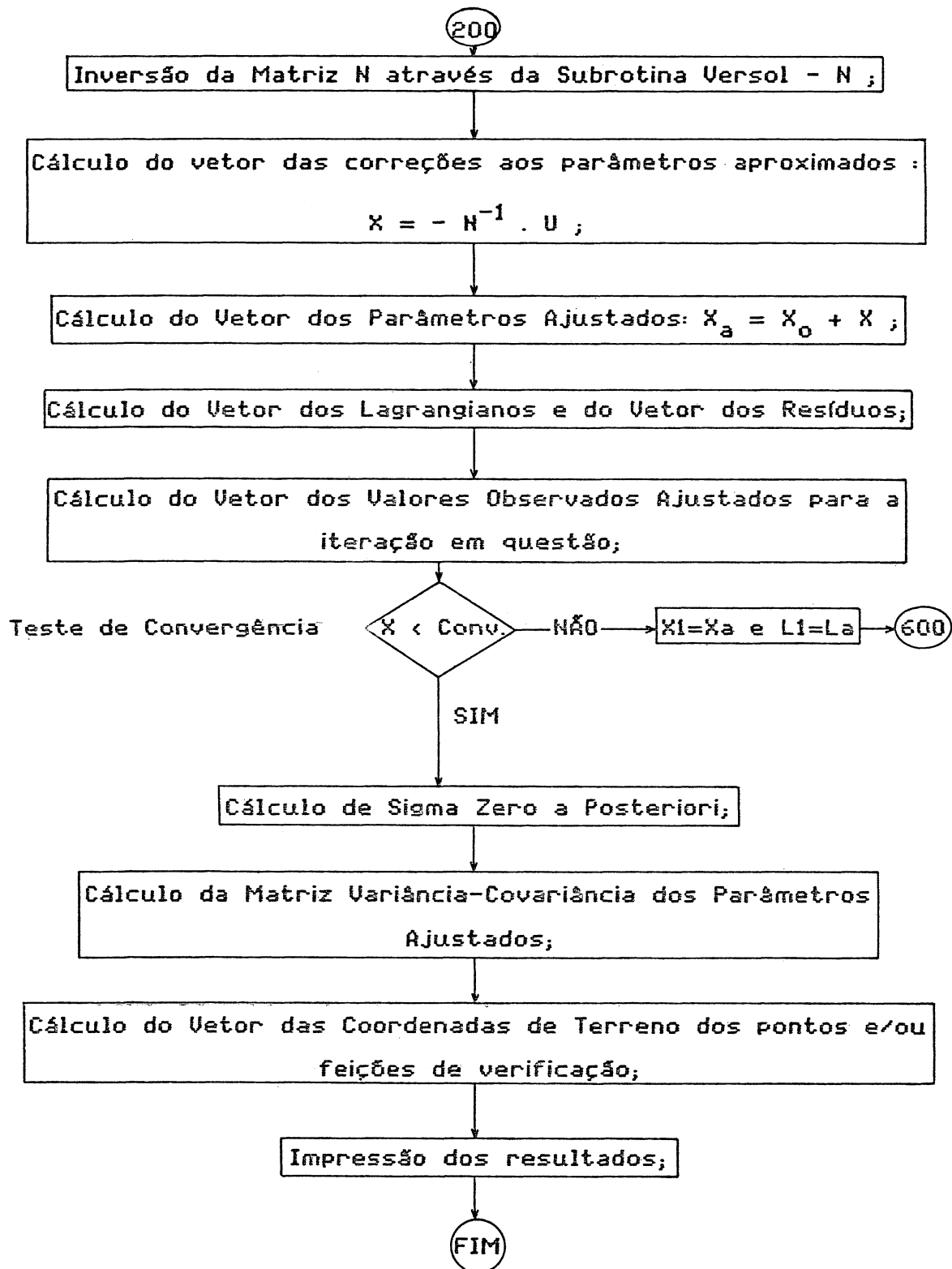
Usando-se testar os modelos matemáticos propostos neste trabalho, elaborou-se programas computacionais para os algoritmos descritos anteriormente, fazendo uso da linguagem BASIC, com execução através do TURBO-BASIC implementado no microcomputador da ITAUTEC, modelo PCXTII.

5.3.1. Fluxograma

Apresenta-se neste item o Fluxograma adotado para os Modelos Polinomiais e para a Equação Projetiva, utilizando-se o Ajustamento pelo Método Combinado.







5.3.2. Critério de Convergência

Valem neste item as mesmas considerações traçadas no item 4.3.2 do Capítulo IV.

CAPÍTULO VI

6. TESTES E RESULTADOS

São apresentados testes utilizando-se dados reais coletados da forma apresentada no Capítulo III e os modelos matemáticos apresentados no Capítulo IV, com os quais efetuou-se testes utilizando-se os programas computacionais elaborados conforme os modelos de ajustamento propostos no Capítulo V.

Optou-se por testes preliminares através de simulação, ou seja, através da geração de dados fictícios, para a detecção de erros de lógica e/ou de programação dos algoritmos elaborados. Assim, arbitrando-se valores para pontos ou para feições retas distribuídos pela imagem, bem como para os parâmetros de transformação, pode-se determinar os valores das coordenadas dos pontos ou das feições que equivalem as coordenadas de terreno dos testes com dados reais. Estas coordenadas na simulação serão denominadas "coordenadas transformadas".

Através desta geração de dados pode-se testar os programas computacionais tendo-se como valores de entrada as coordenadas de imagem e as coordenadas ditas "transformadas". Como incógnitas aparecem os parâmetros de transformação e as coordenadas transformadas dos pontos de verificação ou de pontos pertencentes as feições de verificação.

6.1. SIMULAÇÃO UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE

Nos testes utilizando-se Pontos de Controle na imagem, adotou-se um número total de treze (13) pontos distribuídos conforme mostra a figura 6.1.1. Dentre estes pontos estão os utilizados como controle e aqueles utilizados para verificação.

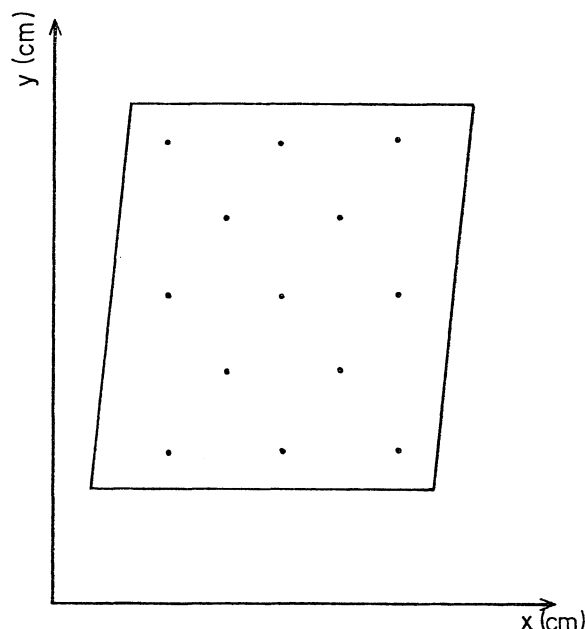


Figura 6.1.1 : Distribuição dos pontos na imagem na simulação para pontos de controle.

Na simulação efetuada para os testes com pontos de controle utilizou-se como modelos matemáticos a Equação Projetiva e o Polinômio de Primeiro Grau.

6.1.1. Teste utilizando a Equação Projetiva

No caso do teste com a Equação Projetiva adotou-se nove (9) dos treze (13) pontos apresentados na figura 6.1.1., sendo que os quatro (4) pontos restantes foram utilizados para a verificação. A figura 6.1.1.1 apresenta a distribuição dos pontos de controle e de verificação para a Equação Projetiva.

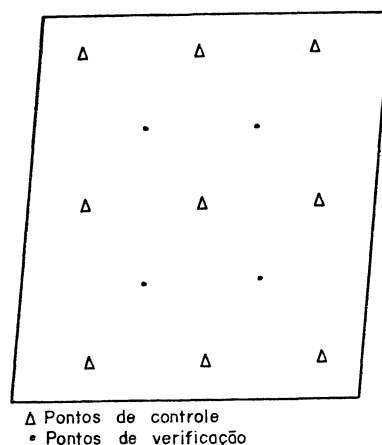


Figura 6.1.1.1: Distribuição dos pontos de controle e de verificação para a simulação com a Equação Projetiva.

Os valores de entrada para a execução dos programas, ou seja, as coordenadas de imagem (x, y) e as coordenadas transformadas para a Equação Projetiva (X_{PR}, Y_{PR}) são apresentadas na tabela 6.1.1.1.

Tabela 6.1.1.1.- Valores de entrada da simulação para a Equação Projetiva

PTOS CONTROLE NUMERO	COORD IMAGEM		COORD TRANSFORMADA	
	x (cm)	y (cm)	X_{PR} (m)	Y_{PR} (m)
1	6,0	24,0	15709,51	6363,35
2	12,0	24,0	15023,33	395,35
3	18,0	24,0	14345,23	-5502,28
4	6,0	16,0	10936,13	5567,49
5	12,0	16,0	10278,30	-395,32
6	18,0	16,0	9628,23	-6287,83
7	6,0	8,0	6163,51	4771,75
8	12,0	8,0	5534,03	-1185,86
9	18,0	8,0	4911,98	-7073,25

A tabela 6.1.1.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais

e aproximados e a tabela 6.1.1.3 apresenta as coordenadas ajustadas e as coordenadas transformadas dos pontos de verificação. A convergência foi atingida num total de cinco iterações.

Tabela 6.1.1.2 - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para a Eq. Projetiva.

PARAM	VALOR AJUST.	VALOR REAL	VALOR APROX.
a_1	-100,00	-100,00	-50,00
a_2	600,00	600,00	500,00
a_3	2000,00	2000,00	1500,0
a_4	0,001	0,001	0,01
a_5	-1,0E-5	-1,0E-5	-1,0E-4
a_6	-1000,00	-1000,00	-800,00
a_7	100,00	100,00	50,00
a_8	10000,00	10000,00	5000,00

Tabela 6.1.1.3 - Coordenadas ajustadas e transformadas dos pontos de verificação.

PONTOS VERIF NUMERO	COORD. AJUSTADAS		COORD. TRANSFORMADAS	
	X_A (m)	Y_A (m)	X_{PR} (m)	Y_{PR} (m)
1	12985,73	2973,83	12985,73	2973,83
2	12317,70	-2956,25	12317,70	-2956,25
3	8226,94	2180,64	8226,94	2180,64
4	7587,10	-3744,29	7587,10	-3744,29

Observando-se os valores das coordenadas ajustadas e das coordenadas transformadas dos pontos de controle, nota-se que estes são todos idênticos. Isto indica que o programa computacional para o teste com a Equação Projetiva utilizando-se pontos de controle está correto.

6.1.2. Teste utilizando-se o Polinômio de Primeiro Grau

No caso do teste com o Polinômio de Primeiro Grau adotou-se os mesmos nove (9) pontos de controle apresentados na Figura 6.1.1.1 para o teste com a Equação Projetiva. Assim, a tabela 6.1.2.1 apresenta os valores de entrada para a simulação.

Tabela 6.1.2.1 - Valores de entrada da simulação para o polinômio de primeiro grau.

PTOS CONTROLE NUMERO	COORD. IMAGEM		COORD. TRANSFORMADA	
	x	y	X ₁₆	Y ₁₆
	(cm)	(cm)	(m)	(m)
1	6,0	24,0	14800	-3400
2	12,0	24,0	14200	-9400
3	18,0	24,0	13600	-15400
4	6,0	16,0	10000	-2600
5	12,0	16,0	9400	-8600
6	18,0	16,0	8800	-14600
7	6,0	8,0	5200	-1800
8	12,0	8,0	4600	-7800
9	18,0	8,0	4000	-13800

A tabela 6.1.2.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais e aproximados enquanto a tabela 6.1.2.3 apresenta as coordenadas ajustadas e as coordenadas transformadas dos pontos de verificação. Neste teste houve convergência na terceira iteração.

Tabela 6.1.2.2 - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para o polinômio de primeiro grau

PARAM	VALOR AJUST.	VALOR REAL	VALOR APROX
a ₀	1000,00	1000,00	0,00
a ₁	-100,00	-100,00	0,00
a ₂	600,00	600,00	0,00
b ₀	5000,00	5000,00	0,00
b ₁	-1000,00	-1000,00	0,00
b ₂	-100,00	-100,00	0,00

Tabela 6.1.2.3 - Coordenadas ajustadas e coordenadas transformadas dos pontos de verificação

PTO VERIFICAÇÃO NUMERO	COORD AJUSTADA		COORD TRANSFORMADA	
	X_A (m)	Y_A (m)	X_{16} (m)	Y_{16} (m)
1	12100,00	-6000,00	12100,00	-6000,00
2	11500,00	-12000,00	11500,00	-12000,00
3	7300,00	-5200,00	7300,00	-5200,00
4	6700,00	-11200,00	6700,00	-11200,00

Observando-se os valores das coordenadas ajustadas dos pontos de verificação nota-se que estes são idênticos aos valores das coordenadas transformadas. Isto indica que o programa computacional para o teste com o polinômio de primeiro grau utilizando-se pontos de controle está correto.

6.2. SIMULAÇÃO UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

Nos testes utilizando-se feições retas como controle adota-se um número total de vinte e cinco (25) feições retas distribuídas na imagem conforme mostra a figura 6.2.1. Dentre estas estão as feições retas que serão utilizadas como controle. As feições retas restantes serão utilizadas para verificação.

Na simulação efetuada para os testes com feições retas como controle utilizou-se como modelos matemáticos a Equação Projetiva e os Polinômios do Primeiro ao Terceiro Graus.

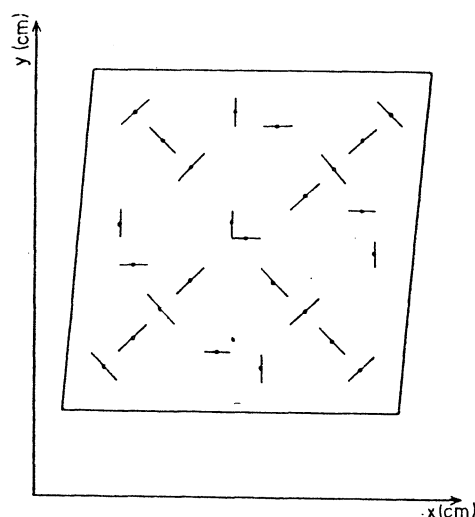


Figura 6.2.1 : Distribuição das feições retas na imagem para a simulação com feições retas como controle.

6.2.1. Teste utilizando-se a Equação Projetiva

No caso do teste com a Equação Projetiva adotou-se dez (10) das vinte e cinco (25) feições retas disponíveis na imagem, conforme mostra a Figura 6.2.1, sendo que as quinze (15) feições restantes foram utilizadas para a verificação. A figura 6.2.1.1 apresenta a distribuição dos pontos centrais das feições retas adotadas como controle bem como os pontos centrais das feições adotadas para a verificação.

Os valores de entrada para a execução dos programas, ou seja, as coordenadas de imagem (x,y) e as coordenadas transformadas para a Equação Projetiva (X_{PR},Y_{PR}) são apresentadas na tabela 6.2.1.1.

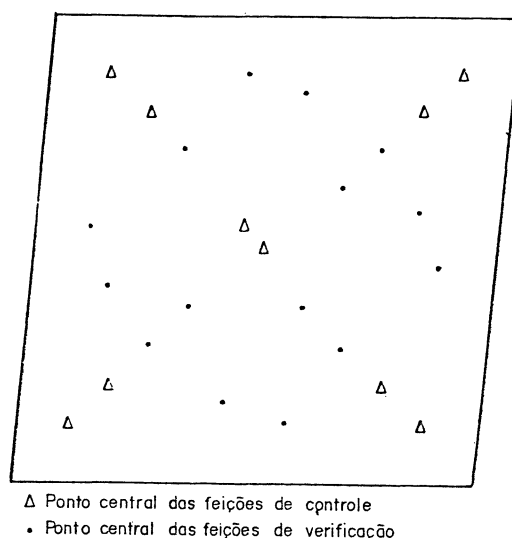


Figura 6.2.1.1. - Distribuição dos pontos centrais das feições de controle e de verificação para o teste com a Equação Projetiva.

Tabela 6.2.1.1. - Valores de entrada da simulação para a equação projetiva adaptada a feições.

PTO CONTR. C. IMAG. NUMERO	COORDENADAS TRANSFORMADAS					
	x	y	X_{PRa}	Y_{PRa}	X_{PRb}	Y_{PRb}
	(cm)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	7,0	27,0	16902,98	6562,33	17862,10	4763,23
2	25,0	27,0	16020,01	-10940,49	14623,59	-13063,74
3	9,0	25,0	16670,97	4564,67	15251,15	2376,80
4	23,0	25,0	13897,59	-9395,55	14847,52	-11135,64
5	14,0	19,0	12428,49	-1972,78	11244,60	-2170,01
6	15,0	18,0	11244,60	-2170,01	11025,58	-4134,59
7	5,0	9,0	7570,48	6972,81	6163,51	4771,75
8	7,0	11,0	7356,60	4970,67	8334,33	3174,98
9	21,0	11,0	7059,65	-8628,47	5675,70	-10764,26
10	23,0	9,0	4501,33	-10959,76	5469,28	-12696,55

A tabela 6.2.1.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais

e aproximados e a tabela 6.2.1.3 apresenta as coordenadas ajustadas e transformadas das feições de verificação.

Tabela 6.2.1.2. - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para a Equação Projetiva.

PARAM	VALOR AJUST	VALOR REAL	VALOR APROX
a ₁	-100,00	-100,00	-50,00
a ₂	600,00	600,00	300,00
a ₃	2000,00	2000,00	1000,00
a ₄	1,0E-3	1,0E-3	1,0E-5
a ₅	-1,0E-5	-1,0E-5	-1,0E-2
a ₆	-1000,00	-1000,00	-500,00
a ₇	100,00	100,00	50,00
a ₈	10000,00	10000,00	5000,00
t ₁	0,5	0,5	0,0
t ₂	0,5	0,5	0,0
t ₃	0,5	0,5	0,0
t ₄	0,5	0,5	0,0
t ₅	0,5	0,5	0,0
t ₆	0,5	0,5	0,0
t ₇	0,5	0,5	0,0
t ₈	0,5	0,5	0,0
t ₉	0,5	0,5	0,0
t ₁₀	0,5	0,5	0,0

Tabela 6.2.1.3. - Coordenadas ajustadas e transformadas dos pontos centrais das feições de verificação.

PTOS CENTRAIS NUMERO	COORD AJUSTADAS		COORD TRANSFORMADAS	
	X _A (m)	Y _A (m)	X ₁₆ (m)	Y ₁₆ (m)
1	16572,46	-1282,39	16572,46	-1282,39
2	15638,22	-4327,56	15638,22	-4327,56
3	14543,37	1286,15	14543,37	1286,15
4	13421,24	-8522,98	13421,24	-8522,98
5	12726,06	5865,92	12726,06	5865,92
6	10825,95	4568,75	10825,95	4568,75
7	8606,45	296,77	8606,45	296,77
8	12465,77	-6772,74	12465,77	-6772,74
9	11439,19	-10754,79	11439,19	-10754,79
10	9571,90	-12013,71	9571,90	-12013,71
11	8821,75	2279,78	8821,75	2279,78
12	9145,89	-5408,86	9145,89	-5408,86
13	7753,69	-7557,39	7753,69	-7557,39
14	6614,67	-1974,53	6614,67	-1974,53
15	11616,35	-4036,19	11616,35	-4036,19

Adotou-se como pontos de verificação os pontos centrais das feições não utilizadas como controle neste teste. Observando-se a tabela 6.2.1.3 nota-se que os valores das coordenadas ajustadas e de verificação são idênticos. Isto indica que o programa computacional para o teste com a Equação Projetiva adaptada a feições está correto.

6.2.2. Teste utilizando-se o Polinômio de Primeiro Grau

No caso do teste com o Polinômio de Primeiro Grau adotou-se as mesmas dez feições utilizadas como controle para o teste com a Equação Projetiva, conforme mostra a Figura 6.2.1.1.

A tabela 6.2.2.1 apresenta os valores de entrada para a simulação.

Tabela 6.2.2.1 - Valores de entrada da simulação para o Polinômio de Primeiro Grau.

FEIÇÕES NUMERO	COORD. IMAGEM		COORD. TRANSFORMADAS			
	x	y	X_{1Ga}	Y_{1Ga}	X_{1Gb}	Y_{1Gb}
	(cm)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	7,0	27,0	16000	-36000	17000	-58000
2	25,0	27,0	15400	-21800	14000	-23600
3	9,0	25,0	15800	-5600	14400	-7400
4	23,0	25,0	13200	-19400	14200	-21600
5	14,0	19,0	11600	-11000	10400	-10800
6	15,0	18,0	10400	-10800	10200	-12800
7	5,0	9,0	6600	0,0	5200	-1800
8	7,0	11,0	6400	-2000	7400	-4200
9	21,0	11,0	6200	-16200	4800	-18000
10	23,0	9,0	3600	-17800	4600	-20000

A tabela 6.2.2.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais e aproximados e a tabela 6.2.2.3 apresenta as coordenadas ajustadas e transformadas dos pontos centrais das feições de

verificação.

Tabela 6.2.2.2 - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para o polinômio de primeiro grau.

PARAM	VALOR AJUST	VALOR REAL	VALOR APROX.
a_0	1000,00	1000,00	0,0
a_1	-100,00	-100,00	0,0
a_2	600,00	600,00	0,0
b_0	5000,00	5000,00	0,0
b_1	-1000,00	-1000,00	0,0
b_2	-100,00	-100,00	0,0
t_1	0,5	0,5	0,0
t_2	0,5	0,5	0,0
t_3	0,5	0,5	0,0
t_4	0,5	0,5	0,0
t_5	0,5	0,5	0,0
t_6	0,5	0,5	0,0
t_7	0,5	0,5	0,0
t_8	0,5	0,5	0,0
t_9	0,5	0,5	0,0
t_{10}	0,5	0,5	0,0

Tabela 6.2.2.3 -Coordenadas ajustadas e coordenadas transformadas das feições de verificação

PTOS CENTRAIS NUMERO	COORD. AJUSTADAS		COORD. TRANSFORMADAS	
	X_A (m)	Y_A (m)	X_{16} (m)	Y_{16} (m)
1	15800,00	-11700,00	15800,00	-11700,00
2	14900,00	-14600,00	14900,00	-14600,00
3	13700,00	-8300,00	13700,00	-8300,00
4	12700,00	-18300,00	12700,00	-18300,00
5	11800,00	-2900,00	11800,00	-2900,00
6	9900,00	-3600,00	9900,00	-3600,00
7	7700,00	-7300,00	7700,00	-7300,00
8	11700,00	-16100,00	11700,00	-16100,00
9	10700,00	-20000,00	10700,00	-20000,00
10	8800,00	-20700,00	8800,00	-20700,00
11	7900,00	-5300,00	7900,00	-5300,00
12	8300,00	-13500,00	8300,00	-13500,00
13	6900,00	-15300,00	6900,00	-15300,00
14	5700,00	-9000,00	5700,00	-9000,00
15	10800,00	-12900,00	10800,00	-12900,00

Adotou-se como pontos de verificação os pontos centrais

das feições não utilizadas como controle neste testes. Observando-se a tabela 6.2.2.3 nota-se que os valores das coordenadas ajustadas e de verificação são idênticos. Isto indica que o programa computacional para o teste com o Polinômio de Primeiro Grau adaptado a feições está correto.

6.2.3. Teste utilizando-se o Polinômio de Segundo Grau

No teste com o Polinômio de Segundo Grau optou-se por um maior número de feições na imagem para que com isso se aumentasse os graus de liberdade do ajustamento. Assim, adotou-se trinta e seis (36) das quarenta (40) feições apresentadas na Figura 6.2.3.1.

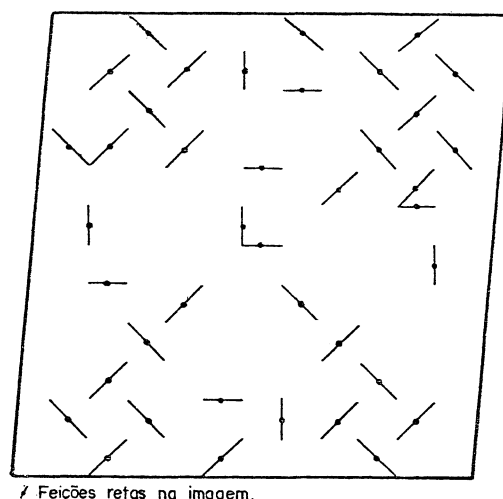


Figura 6.2.3.1. - Distribuição das feições na imagem para o teste com polinômio de segundo grau.

A Figura 6.2.3.2 apresenta a distribuição dos pontos centrais das feições de controle juntamente com os pontos centrais das feições de verificação.

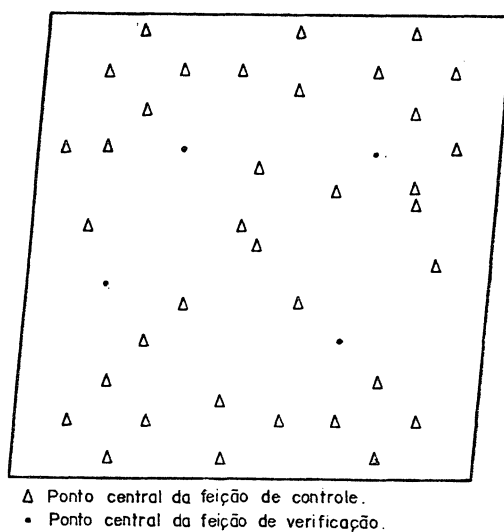


Figura 6.2.3.2 - Distribuição dos pontos centrais das feições de controle e de verificação para o teste com o Polinômio de Segundo Grau.

A tabela 6.2.3.1 apresenta os valores de entrada para a Simulação.

Tabela 6.2.3.1 - Valores de entrada da simulação para o polinômio de segundo grau.

FEIÇÕES NUMERO	COORD. IMAGEM		COORDENADAS TRANSFORMADAS			
	x (cm)	y (cm)	X _{26a} (m)	Y _{26a} (m)	X _{26b} (m)	Y _{26b} (m)
1	7,0	27,0	18221,2	-1966,96	19684,8	-3745,44
2	9,0	25,0	18157,6	-3764,84	16626,0	-5508,32
3	17,0	26,0	18263,2	-10380,36	18379,6	-11890,24
4	25,0	27,0	20478,4	-16054,56	19205,2	-17353,76
5	23,0	25,0	17211,6	-14740,64	18944,8	-16074,28
6	6,0	19,0	13786,0	-1927,6	12355,6	-1882,0
7	14,0	19,0	13738,0	-8774,0	12304,4	-8728,56
8	15,0	18,0	12304,4	-8728,56	12381,6	-10296,2
9	24,0	17,0	13050,4	-15990,76	11636,8	-15929,28
10	5,0	9,0	6980,0	318,6	5563,6	-1410,4
11	7,0	11,0	6874,0	-1537,2	8139,2	-3445,92
12	13,0	10,0	6772,0	-6759,0	6810,0	-8384,4
13	21,0	11,0	8480,0	-13025,28	7322,0	-14310,0
14	23,0	9,0	6005,2	-14183,52	7540,0	-15647,4
15	14,0	27,0	19712,4	-8793,36	18182,8	-8812,88
16	21,0	23,0	17024,0	-13345,92	15726,8	-14727,84
17	11,0	15,0	9466,0	-5280,72	10854,4	-7041,6
18	19,0	21,0	13930	-11851,6	15540,0	-13333,08
19	23,0	20,0	14266	-14698,8	14488,0	-16036,0
20	9,0	13,0	9498,4	-3540,2	8106,0	-5186,48
21	17,0	15,0	10971,2	-10234,56	9696,4	-11666,8
22	16,0	9,0	6884,0	-9952,2	5569,9	-9825,6
23	21,0	27,0	20064	-13322,88	18720,4	-14737,5
24	11,0	27,0	18130	-5505,12	19667,2	-7168,32
25	9,0	29,0	21236	-3709,8	19658	-5485,68
26	23,0	29,0	20253,2	-14717,52	22036	-16018,6
27	9,0	9,0	6804	-3335,4	5458	-4949,28
28	7,0	7,0	4277,2	-1267,36	5492,8	-3208,64
29	19,0	9,0	5678,8	-11335,85	7140	-12915
30	21,0	7,0	5824	-12788,48	4712,4	-14040,8
31	13,0	7,0	4170,4	-6489,4	5496,4	-8257,76
32	17,0	29,0	21348	-10325	19910,8	-11870,64
33	7,0	23,0	15240,4	-1956,96	16654,4	-3768
34	5,0	23,0	16819,2	-114,56	15240,4	-1956,96
35	25,0	23,0	17435,2	-16077,76	16208,4	-17344,56
36	23,0	21,0	14266	-14698,8	15949,6	-16065

A tabela 6.2.3.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais e aproximados para o polinômio de segundo grau e a tabela 6.2.3.3 apresenta as coordenadas ajustadas e as coordenadas transformadas das feições de verificação.

Tabela 6.2.3.2 - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para o polinômio de segundo grau.

PARAM	VALOR AJUST	VALOR REAL	VALOR APROX
a ₀	1000,00	1000,00	0,0
a ₁	-100,00	-100,00	0,0
a ₂	600,00	600,00	0,0
a ₃	4,50	4,50	0,0
a ₄	0,20	0,20	0,0
a ₅	3,00	3,00	0,0
b ₀	5000,00	5000,00	0,0
b ₁	-1000,00	-1000,00	0,0
b ₂	-100,00	-100,00	0,0
b ₃	7,20	7,20	0,0
b ₄	0,01	0,01	0,0
b ₅	2,03	2,03	0,0
t ₁	0,50	0,50	0,0
t ₂	0,50	0,50	0,0
t ₃	0,50	0,50	0,0
t ₄	0,50	0,50	0,0
t ₅	0,50	0,50	0,0
t ₆	0,50	0,50	0,0
t ₇	0,50	0,50	0,0
t ₈	0,50	0,50	0,0
t ₉	0,50	0,50	0,0
t ₁₀	0,50	0,50	0,0
t ₁₁	0,50	0,50	0,0
t ₁₂	0,50	0,50	0,0
t ₁₃	0,50	0,50	0,0
t ₁₄	0,50	0,50	0,0
t ₁₅	0,50	0,50	0,0
t ₁₆	0,50	0,50	0,0
t ₁₇	0,50	0,50	0,0
t ₁₈	0,50	0,50	0,0
t ₁₉	0,50	0,50	0,0
t ₂₀	0,50	0,50	0,0
t ₂₁	0,50	0,50	0,0
t ₂₂	0,50	0,50	0,0
t ₂₃	0,50	0,50	0,0
t ₂₄	0,50	0,50	0,0
t ₂₅	0,50	0,50	0,0
t ₂₆	0,50	0,50	0,0
t ₂₇	0,50	0,50	0,0
t ₂₈	0,50	0,50	0,0
t ₂₉	0,50	0,50	0,0
t ₃₀	0,50	0,50	0,0
t ₃₁	0,50	0,50	0,0
t ₃₂	0,50	0,50	0,0
t ₃₃	0,50	0,50	0,0
t ₃₄	0,50	0,50	0,0
t ₃₅	0,50	0,50	0,0
t ₃₆	0,50	0,50	0,0

Tabela 6.2.3.3 - Coordenadas ajustadas e transformadas das feições de verificação para o polinômio de segundo grau.

PTO CENTRAL NUMERO	COORD. AJUSTADA		COORD. TRANSFORMADA	
	X_A (m)	Y_A (m)	X_{26} (m)	Y_{26} (m)
1	15882,10	-6352,4	15882,10	-6352,4
2	10910,9	-2726,4	10910,9	-2726,4
3	9080,9	-12355,26	9080,9	-12355,26
4	15230,5	-9594,18	15230,5	-9594,18

Adotou-se como pontos de verificação os pontos centrais das feições não utilizadas como controle neste teste. Observando-se a tabela 6.2.3.3 nota-se que os valores das coordenadas ajustadas e de verificação são idênticos. Isto indica que o programa computacional para o teste com o Polinômio de Primeiro Grau adaptado a feições está correto.

6.2.4. Teste utilizando-se Polinômio de Terceiro Grau

No teste com o Polinômio de Terceiro Grau adotou-se as mesmas trinta e seis (36) feições retas apresentadas na Figura 6.2.3.2, sendo que as quatro (4) feições restantes foram utilizadas para a verificação.

Os valores de entrada para a execução do programa, ou seja, as coordenadas de imagem (x , y) e as coordenadas transformadas para o polinômio de terceiro grau (X_{36} , Y_{36}) são apresentadas na tabela 6.2.4.1.

Tabela 6.2.4.1 - Valores de entrada da simulação para o polinômio de terceiro grau adaptado a feições.

FEIÇÕES NUMERO	COORD. IMAGEM		COORD. TRANSFORMADAS			
	x (cm)	y (cm)	X _{36a} (m)	Y _{36a} (m)	X _{36b} (m)	Y _{36b} (m)
1	7,0	27,0	20254,18	-2228,61	22825,85	-3977,38
2	9,0	25,0	20865,08	-3905,26	19504,95	-5343,12
3	14,0	27,0	25190,52	-8019,55	22902,82	-7962,91
4	17,0	26,0	23648,82	-8991,05	24427,40	-9856,82
5	23,0	25,0	23468,50	-11162,30	26953,78	-11478,95
6	25,0	27,0	29787,00	-11349,79	27857,86	-11694,29
7	21,0	23,0	22727,35	-10603,52	20968,81	-11299,18
8	6,0	19,0	14987,68	-1999,17	13328,49	-1907,49
9	11,0	15,0	10439,62	-4931,52	12378,96	-6439,10
10	14,0	19,0	16520,80	-7816,51	14553,77	-7775,55
11	15,0	18,0	14553,77	-7775,55	14943,61	-8917,13
12	23,0	20,0	18581,28	-11421,50	19175,20	-11976,35
13	24,0	17,0	16825,65	-12178,79	14590,22	-12339,55
14	5,0	9,0	7179,98	326,73	5754,17	-1335,09
15	7,0	11,0	7172,86	-1464,77	8712,13	-3268,26
16	13,0	10,0	7357,90	-6251,54	7486,78	-7650,91
17	16,0	9,0	7648,46	-8952,01	6044,89	-8977,73
18	19,0	21,0	17487,04	-9895,94	20320,79	-10659,48
19	21,0	11,0	9850,12	-11127,68	8325,5	-12264,70
20	23,0	9,0	6610,62	-12479,66	8613,58	-13171,75
21	9,0	13,0	10279,90	-3373,42	8818,92	-4843,68
22	16,0	9,0	7648,46	-8952,01	6044,89	-8977,73
23	21,0	27,0	27852,99	-10529,28	26080,36	-11100,86
24	11,0	27,0	21510,47	-5419,92	24368,57	-6842,30
25	9,0	29,0	24842,82	-4044,76	23580,19	-5494,88
26	23,0	29,0	28804,41	-11024,86	32740,42	-11238,95
27	9,0	9,0	7200,46	-3158,38	5769,75	-4662,48
28	7,0	7,0	4383,54	-1197,81	5744,86	-3043,78
29	19,0	9,0	6201,82	-10235,54	8068,30	-11259,0
30	21,0	7,0	6390,55	-11402,88	5007,79	-12710,06
31	13,0	7,0	4370,91	-6131,70	5920,25	-7629,55
32	17,0	29,0	28530,5	-9068,81	26933,21	-9863,14
33	7,0	23,0	16695,02	-2083,25	18960,50	-3828,42
34	5,0	23,0	17975,48	-337,15	16695,02	-2083,25
35	25,0	23,0	24240,76	-11626,43	22357,58	-12138,53
36	23,0	21,0	18581,28	-11421,50	21647,90	-11792,23

A Tabela 6.2.4.2 apresenta os parâmetros ajustados, reais e aproximados e a Tabela 6.2.4.3 apresenta as coordenadas ajustadas e as coordenadas transformadas das feições de verificação.

Tabela 6.2.4.2 - Parâmetros ajustados, reais e aproximados para o Polinômio de Terceiro Grau.

PARAM	VALOR AJUST.	VALOR REAL	VALOR APROX.
a0	1000,00	1000,00	0,0
a1	-100,00	-100,00	0,0
a2	600,00	600,00	0,0
a3	4,50	4,50	0,0
a4	0,20	0,2	0,0
a5	3,00	3,00	0,0
a6	-0,01	-0,01	0,0
a7	0,002	0,002	0,0
a8	0,50	0,50	0,0
a9	-3,0E-4	-3,0E-4	0,0
b0	5000,00	5000,00	0,0
b1	-1000,00	-1000,00	0,0
b2	-100,00	-100,00	0,0
b3	7,20	7,20	0,0
b4	0,01	0,01	0,0
b5	2,03	2,03	0,0
b6	0,002	0,002	0,0
b7	0,50	0,50	0,0
b8	-0,18	-0,18	0,0
b9	0,009	0,009	0,0
t1	0,5	0,5	0,0
t2	0,5	0,5	0,0
t3	0,5	0,5	0,0
t4	0,5	0,5	0,0
t5	0,5	0,5	0,0
t6	0,5	0,5	0,0
t7	0,5	0,5	0,0
t8	0,5	0,5	0,0
t9	0,5	0,5	0,0
t10	0,5	0,5	0,0
t11	0,5	0,5	0,0
t12	0,5	0,5	0,0
t13	0,5	0,5	0,0
t14	0,5	0,5	0,0
t15	0,5	0,5	0,0
t16	0,5	0,5	0,0
t17	0,5	0,5	0,0
t18	0,5	0,5	0,0
t19	0,5	0,5	0,0
t20	0,5	0,5	0,0
t21	0,5	0,5	0,0
t22	0,5	0,5	0,0
t23	0,5	0,5	0,0
t24	0,5	0,5	0,0
t25	0,5	0,5	0,0
t26	0,5	0,5	0,0
t27	0,5	0,5	0,0
t28	0,5	0,5	0,0
t29	0,5	0,5	0,0
t30	0,5	0,5	0,0
t31	0,5	0,5	0,0
t32	0,5	0,5	0,0
t33	0,5	0,5	0,0
t34	0,5	0,5	0,0
t35	0,5	0,5	0,0
t36	0,5	0,5	0,0

Tabela 6.2.4.3 - Coordenadas ajustadas e transformadas das feições de verificação.

PTO CENTRAL NUMERO	COORD. AJUSTADA		COORD. TRANSFORMADA	
	X_A (m)	Y_A (m)	X_{PR} (m)	Y_{PR} (m)
1	11806,27	-2656,27	11806,27	-2656,27
2	10627,86	-10573,02	10627,86	-10573,02
3	18787,51	-6005,66	18787,51	-6005,66
4	18839,84	-8419,23	18839,84	-8419,23

Adotou-se como pontos de verificação os pontos centrais das feições não utilizadas como controle neste teste. Observando-se a tabela 6.2.4.3 nota-se que os valores das coordenadas ajustadas e de verificação são idênticos, o que indica a correção do programa computacional para o teste com o Polinômio de Terceiro Grau adaptado a feições.

Deve-se salientar que, embora se tenha conhecimento de que o método combinado exige que sejam estimados valores aproximados diferentes de zero para que a matriz normal não se anule na primeira iteração, neste trabalho, no caso particular dos modelos polinomiais, pode-se arbitrar valores iguais a zero para tais parâmetros. Isto se deve ao fato de que a matriz B apresenta valores que não se anulam com o uso de parâmetros aproximados iguais a zero (este é o caso dos elementos dF/dX_a e dF/dY_a). Tal fato possibilita a utilização de parâmetros aproximados iguais a zero, sem comprometer a convergência e os resultados finais do ajustamento.

6.3. TESTES COM DADOS REAIS UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE

O Ajustamento de Observações adotado (ver Capítulo V) apresenta como valores de entrada as coordenadas de imagem e de carta dos pontos de controle. São valores de saída os parâmetros ajustados e as coordenadas das feições de verificação. É com base nestes resultados que se pode testar a

qualidade dos modelos matemáticos adotados para esta pesquisa. Foram efetuados testes utilizando-se o setor da imagem correspondente ao fuso cujo meridiano central é de 45 W.

Os resultados são apresentados em dois tipos de tabelas, sendo que o primeiro tipo apresenta os parâmetros ajustados e desvios-padrão.

O segundo tipo de tabela apresenta a média dos erros planimétricos. Considera-se *erro planimétrico* o módulo da diferença entre os valores das coordenadas ajustadas e das coordenadas consideradas reais (ou de terreno) para cada feição de verificação. Assim:

$$e_{NF} = |N_{AF} - N_{RF}| \quad (6.3.1)$$

onde: e_{NF} : erro planimétrico na direção N da

feição de verificação,

N_{AF} : coordenada N ajustada da feição

de verificação,

N_{RF} : coordenada N real (de terreno) da

feição de verificação.

$$E_{NF} = \frac{\sum_{i=1}^{n_F} (e_{NF})_i}{n_F} \quad (6.3.2)$$

sendo n_F : o número total de feições de verificação.

E_{NF} : média dos erros planimétricos das feições na direção N.

Além dos E_{NF} a tabela apresenta também os Erros Médios Quadráticos para cada teste efetuado, sendo:

$$EMQ_{NF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_F} (e_{NF})_i^2}{n_F}} \quad (6.3.3)$$

Considerando-se o pequeno número de pontos de controle

identificados na imagem, foi possível se testar os modelos matemáticos baseados no Polinômio de Primeiro Grau e na Equação Projetiva. Esta carência de pontos de controle acabou por acarretar o uso de feições retas como verificação dos testes efetuados.

Sabe-se que as feições retas superestimam os valores dos erros quando utilizadas para verificação da qualidade dos modelos. Isto se deve ao fato de, no trabalho com feições, não haver correspondência ponto a ponto entre as observações na imagem e na carta topográfica. A um ponto observado na imagem corresponde um segmento de reta na carta topográfica.

Um dos artifícios que podem ser utilizados para o caso de feições como verificação é a determinação de uma coordenada "N calculada", dada em função da coordenada E ajustada e da equação simplificada da reta apresentada no Capítulo V.

Assim:

$$N_C = c_1 \cdot E_A + c_2 \quad (6.3.4)$$

$$c_1 = (N_2 - N_1) / (E_2 - E_1) \quad (6.3.5)$$

$$c_2 = (E_2 \cdot N_1 - E_1 \cdot N_2) / (E_2 - E_1). \quad (6.3.6)$$

onde: N_C : valor de N calculado (incógnita);

c_1 , c_2 : parâmetros da reta;

$(E_1$, $N_1)$ e $(E_2$, $N_2)$: coordenadas de carta dos extremos da feição de verificação;

$(E_A$, $N_A)$: coordenadas ajustadas da feição de verificação.

Utiliza-se como erro planimétrico da feição na direção N o valor obtido da expressão:

$$e_{NF} = N_A - N_C \quad (6.3.7)$$

sendo e_{NF} o Erro Planimétrico da feição calculado para a direção N. Chama-se de E_{NF} a média dos erros planimétricos calculados para a direção N. Nesta aproximação considera-se como real o valor ajustado da coordenada ' E_A '. Isto faz com que o valor de N_C apresente o erro planimétrico da coordenada ' E ' ajustada. Este erro é acumulado na coordenada N_C e portanto as feições de verificação aparecem com componente somente na direção Norte-Sul. Assim, com exceção de alguns pontos de verificação que possuam valores muito pequenos na direção Este-Oeste (menores que 25 metros e portanto impossíveis de serem representados na escala 1:50.000 que é a escala adotada para a representação dos vetores dos erros residuais), a maioria dos vetores representados nesta direção correspondem a feições de verificação.

Devido a impossibilidade de quantificar a superestimação dos erros em função do uso de feições como verificação, deve-se salientar que a comparação entre os testes com pontos de controle e com feições como controle só será possível através das feições de verificação. Não se pode comparar portanto os resultados entre pontos e feições de verificação.

6.3.1. Testes para o Setor da Imagem TM pertencente ao Fuso cujo Meridiano Central é o de $45^\circ W$.

Os testes para o setor da imagem pertencente ao fuso cujo meridiano central é o de $45^\circ W$ é efetuado em função da extensa área da imagem compreendida neste setor e do grande número de feições retas obtidas nesta área.

Observando-se a Figura 6.3.1.1, cuja escala é 1:3.000.000, nota-se uma pobre distribuição dos pontos de controle no setor da imagem em estudo.

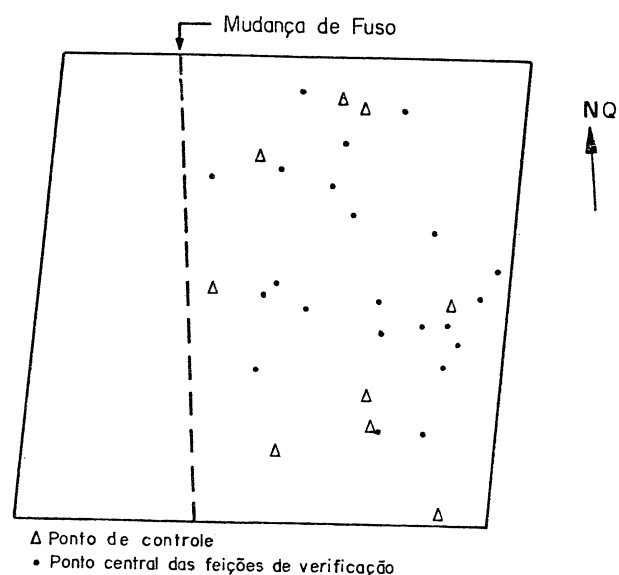


Figura 6.3.1.1 - Distribuição dos pontos de controle e das feições de verificação na Imagem TM - 45°W.

Os resultados obtidos para os parâmetros e seus desvios-padrão para os diversos modelos matemáticos propostos são apresentados a seguir.

Tabela 6.3.1.1 - Parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrão para o polinômio do primeiro grau.

PONTOS DE CONTROLE - IMAGEM TM - 45°W.		
MOD. MAT. : POLINÔMIO DO PRIMEIRO GRAU		
PONTOS DE CONTROLE : 9	PARAM. TRANSF : 6	
GRAUS DE LIBERDADE : 12	NUM. ITERAÇÕES : 3	
PARÂMETROS	VALOR AJUST.	DESVIO PADRÃO
a_0	1568,60	58,96
a_1	-123,98	0,911
a_2	987,29	1,601
b_0	4616,80	58,96
b_1	-989,26	0,911
b_2	-130,25	1,601

Tabela 6.3.1.2 - Parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrão para a Equação Projetiva

PONTOS DE CONTROLE - IMAGEM TM - MC: 45°W MOD. MAT. : EQUAÇÃO PROJETIVA PONTOS DE CONTROLE : 9 PARAM. TRANSF. : 8 GRAUS DE LIBERDADE : 10 NUM. ITERAÇÕES : 7					
PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.	PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.
a ₁	-123,95	1,031	a ₅	-9,80E-6	3,57E-5
a ₂	986,82	2,134	a ₆	-988,54	1,524
a ₃	-1555,73	67,46	a ₇	-129,42	2,259
a ₄	-1,30E-5	2,08E-5	a ₈	4657,87	8,034

A seguir, apresenta-se a Tabela 6.3.1.3, com a média dos erros planimétricos na direção N para as feições de verificação e os Erros Médios Quadráticos (EMQ). Isto é feito para todos os modelos matemáticos apresentados para o setor da imagem pertencente ao fuso cujo meridiano central é o de 45 W.

Tabela 6.3.1.3. Média dos Erros planimétricos na direção N para feições de verificação e respectivos EMQs para M.C: 45 W.

PONTOS DE CONTROLE - IMAGEM TM - MC: 45°W. PONTOS DE CONTROLE : 9 FEIÇÕES VERIF. : 24 DPC : 25m DPM : 0,015mm TOLERÂNCIA: 0,01		
MOD. MATEMÁTICO	E _{NF} (m)	EMQ _{NF} (m)
EQUAÇÃO PROJETIVA	88,31	101,40
POL. PRIMEIRO GRAU	89,35	108,49

6.4. TESTES COM DADOS REAIS UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

O ajustamento de observações adotado (ver Capítulo VI) apresenta como valores de entrada as coordenadas de imagem de um ponto qualquer das feições retas e as coordenadas reais (de terreno) dos pontos extremos das feições destinadas ao

ajustamento e denominadas aqui de 'feições de controle' . São dados de saída os valores dos parâmetros ajustados e as coordenadas ajustadas dos pontos e/ou feições de verificação, previamente selecionados para se testar a qualidade dos modelos matemáticos adotados.

A apresentação dos resultados é feita na forma de tabelas e figuras que representarão os vetores de erros residuais.

Serão apresentadas tabelas de dois tipos distintos. Uma delas contém informações a respeito dos testes específicos com os modelos matemáticos relacionados com seus respectivos parâmetros ajustados e desvios-padrão.

O outro tipo de tabela apresenta as médias dos erros planimétricos. Considera-se *erro planimétrico* o módulo das diferenças entre os valores das coordenadas ajustadas e das coordenadas consideradas reais (de terreno). Desta forma tem-se:

- e_{EP} que é o erro planimétrico da coordenada 'E' para os pontos de verificação. Assim:

$$e_{EP} = |E_{AP} - E_{RP}| \quad (6.4.1)$$

onde E_{AP} é a coordenada 'E' ajustada e E_{RP} é a coordenada 'E' real (de terreno) para os pontos de verificação.

- e_{NP} que é o erro planimétrico da coordenada 'N' para os pontos de verificação. Assim:

$$e_{NP} = |N_{AP} - N_{RP}| \quad (6.4.2)$$

onde N_{AP} é a coordenada 'N' ajustada e N_{RP} é a coordenada 'N' real (de terreno) para os pontos de verificação.

- e_{NF} que é o erro planimétrico da coordenada 'N' para as feições de verificação.

Assim têm-se :

$$e_{NF} = |N_{AF} - N_{RF}| \quad (6.4.3)$$

onde N_{AF} é a coordenada 'N' ajustada e N_{RF} é a coordenada 'N' real para as feições de verificação.

- e_{NT} que é o erro planimétrico para as coordenadas 'N' do total de pontos e feições de verificação.

Apresenta-se também o Erro Médio Quadrático para cada teste efetuado, onde:

- EMQ_{EP} representa o Erro Médio Quadrático das coordenadas 'E' para os pontos de verificação.

$$EMQ_{EP} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{np} (e_{EP})_i^2 \right) / n_p} \quad (6.4.4)$$

- EMQ_{NP} que representa o Erro Médio Quadrático das coordenadas 'N' para os pontos de verificação.

$$EMQ_{NP} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{np} (e_{NP})_i^2 \right) / n_p} \quad (6.4.5)$$

- EMQ_{NF} que representa o Erro Médio Quadrático das coordenadas 'N' para as feições de verificação.

$$EMQ_{NF} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{nf} (e_{NF})_i^2 \right) / n_f} \quad (6.4.6)$$

- EMQ_{NT} que representa o Erro Médio Quadrático das coordenadas 'N' para o total de pontos e feições de verificação (NT).

$$EMQ_{NT} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{nt} (e_{NT})_i^2 \right) / (n_T)} \quad (6.4.7)$$

Além destas informações tem-se:

- o tipo de controle adotado seguido do tipo de imagem e do tipo de teste efetuado;
- o número de feições de controle e de pontos de verificação;
- a tolerância e o número de feições de verificação;
- o desvio-padrão do monocomparador (DPM) seguido do

desvio-padrão da carta (DPC) e do número total de pontos e feições de verificação (NT).

6.4.1. Testes para o setor da imagem pertencente ao fuso cujo meridiano central é o de 45°W .

Pretende-se, neste trabalho, testar os modelos matemáticos para pontos e feições pertencentes ao fuso cujo meridiano central é o de 45°W . Assim, as coordenadas de imagem adotadas são aquelas obtidas de leituras no monocomparador e as coordenadas de terreno são aquelas obtidas através de leituras no coordenatógrafo de precisão.

Estes testes foram efetuados segundo a distribuição das feições de controle apresentada na Figura 6.4.1.1.

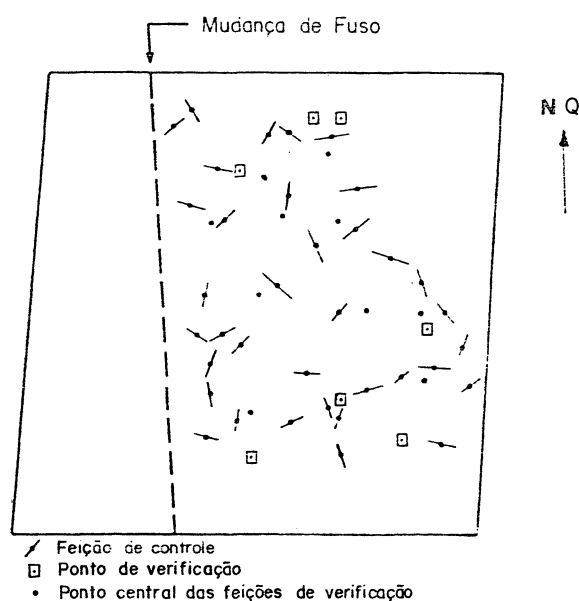


Figura 6.4.1.1. : Distribuição das feições de controle e dos pontos de verificação juntamente com os pontos centrais das feições de verificação na imagem TM - 45°W .

Os resultados obtidos para os parâmetros e seus respectivos desvios-padrão para os modelos matemáticos propostos são apresentados a seguir.

Tabela 6.4.1.1 - Parâmetros ajustados e respectivos

desvios-padrão para o polinômio de primeiro grau.

FEIÇÕES RETAS - IMAGEM TM - 45°W					
MOD. MATEMÁTICO : POLINÔMIO DO PRIMEIRO GRAU					
FEIÇÕES DE CONTROLE : 36			PARAM. TRANSF. : 6		
GRAUS DE LIBERDADE : 30			PARAM. RETA : 36		
NUMERO DE ITERAÇÕES : 4			TOTAL DE PARAM. : 42		
PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.	PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR
a ₀	1526,15	9,16	t ₁₆	0,32	1,90E-2
a ₁	-124,02	0,18	t ₁₇	0,24	1,82E-2
a ₂	988,43	0,22	t ₁₈	0,50	2,17E-2
b ₀	4562,83	7,51	t ₁₉	0,88	1,72E-2
b ₁	-990,17	0,19	t ₂₀	0,67	1,97E-2
b ₂	-125,85	0,19	t ₂₁	0,40	9,76E-3
t ₁	0,36	1,52E-2	t ₂₂	0,39	5,21E-2
t ₂	0,45	9,80E-3	t ₂₃	0,76	1,23E-2
t ₃	0,92	1,74E-2	t ₂₄	0,44	1,42E-2
t ₄	0,53	1,87E-2	t ₂₅	0,51	1,18E-2
t ₅	0,75	1,33E-2	t ₂₆	0,43	7,89E-3
t ₆	0,43	1,72E-2	t ₂₇	0,60	7,29E-3
t ₇	0,76	1,94E-2	t ₂₈	0,38	1,02E-2
t ₈	0,39	1,77E-2	t ₂₉	0,46	1,72E-2
t ₉	0,73	1,07E-2	t ₃₀	0,33	1,59E-2
t ₁₀	0,50	2,33E-2	t ₃₁	0,52	2,32E-2
t ₁₁	0,27	3,04E-2	t ₃₂	0,55	1,68E-2
t ₁₂	0,38	1,49E-2	t ₃₃	0,79	1,02E-2
t ₁₃	0,79	1,97E-2	t ₃₄	0,43	2,84E-2
t ₁₄	0,57	8,92E-3	t ₃₅	0,62	8,85E-3
t ₁₅	0,68	8,35E-3	t ₃₆	0,20	1,79E-2

Tabela 6.4.1.2 - Parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrão para o polinômio de segundo grau

FEIÇÕES RETAS - IMAGEM TM - 45°W					
MOD. MATEMÁTICO : POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU					
FEIÇÕES DE CONTROLE : 36			PARAM. TRANSF. : 12		
GRAUS DE LIBERDADE : 24			PARAM. RETA : 36		
NUMERO DE ITERAÇÕES : 3			TOTAL DE PARAM. : 48		
PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.	PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR
a ₀	1527,30	12,86	t ₁₃	0,79	1,89E-2
a ₁	-123,73	0,36	t ₁₄	0,57	8,02E-3
a ₂	988,25	0,32	t ₁₅	0,68	7,45E-3
a ₃	-3,66E-3	5,94E-3	t ₁₆	0,32	1,64E-2
a ₄	8,24E-3	7,92E-3	t ₁₇	0,24	1,62E-2
a ₅	-2,47E-3	6,02E-3	t ₁₈	0,51	1,98E-2
b ₀	4549,60	10,48	t ₁₉	0,89	1,49E-2
b ₁	-989,84	0,26	t ₂₀	0,67	1,80E-2
b ₂	-126,27	0,29	t ₂₁	0,40	8,87E-3
b ₃	-2,24E-3	4,81E-3	t ₂₂	0,39	4,69E-2
b ₄	1,77E-2	6,54E-3	t ₂₃	0,76	1,11E-2
b ₅	2,59E-3	6,86E-3	t ₂₄	0,45	1,34E-2
t ₁	0,35	1,32E-2	t ₂₅	0,52	1,05E-2
t ₂	0,45	8,83E-3	t ₂₆	0,43	6,90E-3
t ₃	0,93	1,58E-2	t ₂₇	0,60	6,32E-3
t ₄	0,52	1,61E-2	t ₂₈	0,39	1,01E-2
t ₅	0,75	1,19E-2	t ₂₉	0,47	1,51E-2
t ₆	0,43	1,55E-2	t ₃₀	0,32	1,40E-2
t ₇	0,76	1,71E-2	t ₃₁	0,52	2,16E-2
t ₈	0,39	1,53E-2	t ₃₂	0,53	1,68E-2
t ₉	0,73	9,24E-3	t ₃₃	0,80	1,03E-2
t ₁₀	0,50	2,12E-2	t ₃₄	0,48	2,72E-2
t ₁₁	0,25	3,15E-2	t ₃₅	0,62	9,43E-3
t ₁₂	0,38	1,27E-2	t ₃₆	0,20	1,78E-2

Tabela 6.4.1.3 - Parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrão para o polinômio de terceiro grau.

FEIÇÕES RETAS - IMAGEM TM - 45°W					
MOD. MATEMÁTICO : POLINÔMIO DO TERCEIRO GRAU					
FEIÇÕES DE CONTROLE : 36			PARAM. TRANSF. : 20		
GRAUS DE LIBERDADE : 16			PARAM. RETA : 36		
NUMERO DE ITERAÇÕES : 4			TOTAL DE PARAM. : 56		
PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.	PARAM	VALOR AJUST.	DESU.PADR.
a ₀	1535,51	25,80	t ₉	0,72	1,16E-2
a ₁	-123,22	0,63	t ₁₀	0,51	2,45E-2
a ₂	988,46	0,88	t ₁₁	0,23	4,32E-2
a ₃	-8,89E-3	1,88E-2	t ₁₂	0,37	1,64E-2
a ₄	2,82E-2	3,87E-2	t ₁₃	0,78	2,56E-2
a ₅	-1,70E-2	2,58E-2	t ₁₄	0,57	1,00E-2
a ₆	-7,73E-5	2,08E-4	t ₁₅	0,68	9,76E-3
a ₇	-1,97E-4	4,39E-4	t ₁₆	0,33	2,39E-2
a ₈	2,77E-4	6,22E-4	t ₁₇	0,24	2,28E-2
a ₉	-2,08E-4	4,83E-4	t ₁₈	0,51	2,84E-2
b ₀	4577,48	16,98	t ₁₉	0,90	1,69E-2
b ₁	-989,76	0,40	t ₂₀	0,68	2,44E-2
b ₂	-126,81	0,71	t ₂₁	0,40	1,02E-2
b ₃	-3,01E-2	1,35E-2	t ₂₂	0,44	6,32E-2
b ₄	6,57E-2	2,54E-2	t ₂₃	0,76	1,38E-2
b ₅	-2,28E-2	1,88E-2	t ₂₄	0,45	2,01E-2
b ₆	2,13E-4	1,59E-4	t ₂₅	0,52	1,20E-2
b ₇	-6,14E-4	2,87E-4	t ₂₆	0,44	9,45E-3
b ₈	5,66E-4	4,11E-4	t ₂₇	0,61	1,01E-2
b ₉	-4,99E-5	3,53E-4	t ₂₈	0,39	1,79E-2
t ₁	0,33	1,62E-2	t ₂₉	0,48	1,89E-2
t ₂	0,44	1,05E-2	t ₃₀	0,31	1,98E-2
t ₃	0,92	1,89E-2	t ₃₁	0,53	2,65E-2
t ₄	0,51	1,89E-2	t ₃₂	0,52	2,13E-2
t ₅	0,76	1,37E-2	t ₃₃	0,80	2,12E-2
t ₆	0,42	1,84E-2	t ₃₄	0,48	3,38E-2
t ₇	0,78	2,15E-2	t ₃₅	0,61	1,58E-2
t ₈	0,39	1,75E-2	t ₃₆	0,21	2,69E-2

Tabela 6.4.1.4 - Parâmetros ajustados e respectivos desvios-padrão para a Equação Projetiva

FEIÇÕES RETAS - IMAGEM TM - 45°W					
MOD. MATEMÁTICO : EQUAÇÃO PROJETIVA					
FEIÇÕES DE CONTROLE : 36			PARAM. TRANSF. : 8		
GRAUS DE LIBERDADE : 28			PARAM. RETA : 36		
NUMERO DE ITERAÇÕES : 4			TOTAL DE PARAM. : 44		
PARAM	VALOR AJUST.	DESV.PADR.	PARAM	VALOR AJUST.	DESV.PADR.
a ₁	-123,99	0,20	t ₁₅	0,68	7,39E-3
a ₂	988,24	0,23	t ₁₆	0,31	1,66E-2
a ₃	1538,40	9,55	t ₁₇	0,24	1,65E-2
a ₄	-2,93E-6	4,18E-6	t ₁₈	0,50	1,98E-2
a ₅	1,14E-5	3,36E-6	t ₁₉	0,88	1,52E-2
a ₆	-989,44	0,19	t ₂₀	0,66	1,77E-2
a ₇	-126,08	0,18	t ₂₁	0,40	8,56E-3
a ₈	4556,15	8,72	t ₂₂	0,40	4,58E-2
t ₁	0,35	1,35	t ₂₃	0,76	1,09E-2
t ₂	0,45	8,93E-3	t ₂₄	0,44	1,24E-2
t ₃	0,92	1,53E-2	t ₂₅	0,52	1,03E-2
t ₄	0,53	1,65E-2	t ₂₆	0,43	6,96E-3
t ₅	0,75	1,19E-2	t ₂₇	0,60	6,40E-3
t ₆	0,43	1,54E-2	t ₂₈	0,38	9,04E-3
t ₇	0,76	1,72E-2	t ₂₉	0,46	1,55E-2
t ₈	0,39	1,55E-2	t ₃₀	0,33	1,40E-2
t ₉	0,73	9,32E-3	t ₃₁	0,52	2,06E-2
t ₁₀	0,49	2,05E-2	t ₃₂	0,53	1,71E-2
t ₁₁	0,28	2,86E-2	t ₃₃	0,79	9,69E-3
t ₁₂	0,38	1,30E-2	t ₃₄	0,45	2,54E-2
t ₁₃	0,80	1,82E-2	t ₃₅	0,62	7,78E-3
t ₁₄	0,57	7,91E-3	t ₃₆	0,20	1,60E-2

A Tabela 6.4.1.5 apresenta os erros planimétricos para os pontos e feições de verificação assim como seus respectivos erros médios quadráticos. São apresentados todos os modelos matemáticos testados para a imagem TM - 45°W.

Tabela 6.4.1.5 - Média dos erros planimétricos e EMQs para os pontos e feições de verificação para os testes com a imagem TM - 45°W.

FEIÇÕES RETAS - IMAGEM TM - MC : 45°W								
FEIÇÕES DE CONTROLE : 36					PONTOS DE VERIF.: 7			
TOLERÂNCIA : 0,01					FEIÇÕES DE VERIF.: 10			
DPM : 0,015mm					DPC: 25m PTOS+FEIÇÕES DE VERIF.: 17			
MOD.MAT	E _{EP}	E _{NP}	E _{NF}	E _{NT}	EMQ _{EP}	EMQ _{NP}	EMQ _{NF}	EMQ _{NT}
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1ºGRAU	34,45	40,62	49,80	46,02	45,70	57,08	63,53	60,96
2ºGRAU	34,24	51,57	60,00	56,53	52,05	73,28	76,97	75,69
3ºGRAU	44,33	51,94	54,10	53,21	57,19	71,70	74,53	73,38
PROJET	31,12	48,53	47,71	48,05	42,12	70,34	61,40	65,23

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo os resultados dos testes utilizando-se pontos de controle e feições retas como controle são discutidos. Para tanto faz-se uso de tabelas relacionando os modelos matemáticos testados com a média dos erros planimétricos e com os erros médios quadráticos para os testes efetuados para o setor da imagem pertencente ao fuso cujo meridiano central é o de $45^{\circ}W$.

Além das tabelas são utilizadas figuras da imagem, onde aparecem os pontos de controle juntamente com os pontos centrais das feições de verificação na escala 1:3.000.000. Os vetores residuais das feições de verificação estão representados na escala 1:50.000 no caso dos testes referentes à pontos de controle.

No caso dos testes utilizando-se feições retas como controle são representados nas figuras os pontos centrais das feições de controle, os pontos de verificação e os pontos centrais das feições de verificação na escala 1:3.000.000. Os vetores dos erros planimétricos dos pontos e das feições de verificação estão na escala 1:50.000.


7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO-SE PONTOS DE CONTROLE

A distribuição dos pontos de controle na imagem apresenta-se de forma escassa em função da dificuldade de localização de pontos nitidamente visíveis na imagem e que possuam correspondentes nas cartas topográficas. Além de

escassos, muitos pontos de controle encontrados apresentam-se pouco visíveis quando da leitura de suas coordenadas no monocomparador, tendo portanto que ser abandonados. Com isso, os poucos pontos restantes apresentam-se de forma irregular ao longo da imagem, aparecendo concentrados em alguns setores e ausentes em outros.

Um resumo dos resultados alcançados para os testes com pontos de controle é apresentado na Tabela 7.1.1 e a representação dos vetores dos erros planimétricos e dos pontos de controle distribuídos na imagem é dada pela Figura 7.1.1.

Tabela 7.1.1 - Erros planimétricos e EMQs para os testes com pontos de controle

	PONTOS DE CONTROLE MODELO MATEMÁTICO	
	EQUAÇÃO PROJETIVA	POLIN. PRIMEIRO GRAU
E_{NF} (m)	88,31	89,35
EMQ_{HF} (m)	101,40	108,49

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 7.1.1, nota-se que os valores das médias dos erros planimétricos e dos erros médios quadráticos são bastante elevados quando comparados com os resultados obtidos pelo INPE, que estão por volta de 50 metros, ou seja, praticamente a metade dos valores apresentados nesta tabela. Justifica-se este fato primeiramente em função da escassez de pontos de controle na imagem o que forçou o uso de pequena quantidade de pontos de controle e de feições retas como verificação. Sabe-se que o uso de feições retas como verificação implica em limitações quando da análise dos resultados. Neste trabalho adotou-se como procedimento para a análise dos resultados dos testes utilizando-se feições como verificação, o estudo dos erros planimétricos da

coordenada 'N' das feições de verificação, que apresentam em si erros correspondentes a coordenada 'E' associados aos erros correspondentes a própria coordenada 'N' (ver item 6.3). Isto faz com que o valor absoluto do erro planimétrico para a coordenada 'N' seja aumentado, o que inviabiliza a comparação direta dos resultados com os obtidos utilizando-se exclusivamente pontos de verificação.

Analisando-se a figura 7.1.1, com a representação dos pontos de controle e das feições retas utilizadas como verificação, observa-se que os pontos de controle estão distribuídos na imagem de forma que os setores como o nordeste e o centro da área de estudo estejam desprovidos de controle.

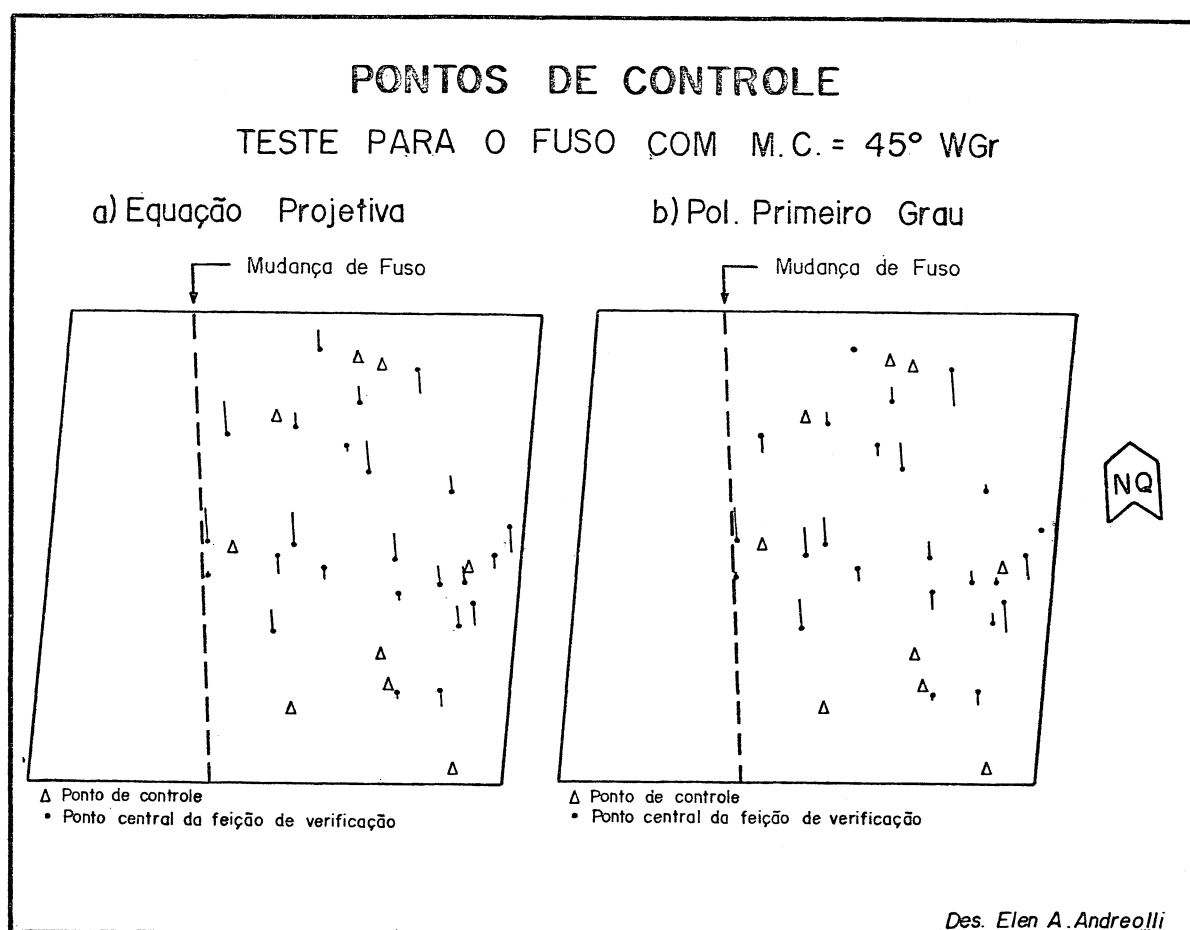


Figura 7.1.1. : Representação dos pontos de controle e dos vetores dos erros planimétricos para o teste com M.C.:45° W. Escala da imagem : 1:3.000.000. Escala dos vet. erros : 1:50.000.

Observa-se, através da figura 7.1.1., que tanto para o Polinômio de Primeiro Grau quanto para a Equação Projetiva, aparece uma relativa homogeneidade na dimensão dos vetores dos erros planimétricos, sendo maiores as discrepâncias da maioria das feições de verificação posicionadas externamente aos pontos de controle. Acredita-se que, com uma maior quantidade de pontos de controle, distribuídos de forma mais homogênea pela imagem, pode-se chegar a valores melhorados de erros planimétricos e erros médios quadráticos.

7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO-SE FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

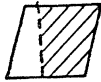
Nos testes utilizando-se feições retas como controle foi possível se identificar uma grande quantidade de feições na imagem TM-LANDSAT. Sómente ficaram desprovidos de controle os setores da imagem com ausência de cartas topográficas e os setores onde eram escassas as vias de acesso como as estradas de rodagem, principal fonte de feições retas neste trabalho.

Da mesma forma que o apresentado para pontos de controle, foram efetuados testes para o setor da imagem pertencente ao fuso cujo Meridiano Central é o de 45° W. Assim, escolhidos os modelos matemáticos, definiu-se as feições de controle e os pontos e feições de verificação, que permanecem os mesmos para todos os testes efetuados.

A Tabela 7.2.1 apresenta os resultados na forma de média dos erros planimétricos e de erros médios quadráticos para os testes efetuados com feições retas como controle.

Através da Figura 7.2.1 apresenta-se a distribuição das feições retas utilizadas como controle e os vetores dos erros planimétricos para os pontos e as feições de verificação.

Tabela 7.2.1 - Média dos erros planimétricos e EMQs para os testes com feições retas como controle.

	FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE MODELOS MATEMÁTICOS			
	PROJETIVA	1º GRAU	2º GRAU	3º GRAU
$E_{EP}(m)$	31,12	34,45	34,24	44,33
$E_{NP}(m)$	48,53	40,65	51,57	51,94
$E_{NF}(m)$	47,71	49,80	60,00	54,10
$E_{NT}(m)$	48,05	46,02	56,53	53,21
$EMQ_{EP}(m)$	42,12	45,70	52,05	57,19
$EMQ_{NP}(m)$	70,34	57,08	73,28	71,70
$EMQ_{NF}(m)$	61,40	63,53	76,97	74,53
$EMQ_{NT}(m)$	65,23	60,96	75,69	73,38

A Tabela 7.2.1 apresenta as médias dos erros planimétricos e os erros médios quadráticos para a coordenada 'E' dos pontos de verificação (EP), para as coordenada 'N' dos pontos de verificação (NP), para a coordenada 'N' das feições de verificação (NF) e para a coordenada 'N' do total de pontos e feições de verificação (NT).


Observa-se, de maneira geral, que a média dos erros planimétricos e dos erros médios quadráticos apresentam valores aceitáveis, sendo que os melhores resultados concentram-se na coordenada 'E' dos pontos de verificação (EP).

Com relação aos diferentes modelos matemáticos, nota-se que os resultados são próximos uns dos outros, isto para os quatro modelos estudados neste trabalho. Não se nota grandes alterações de um modelo para o outro, embora, em todos os casos destaquem-se melhores resultados para os modelos lineares, ou seja, para o Polinômio de Primeiro Grau e para a Equação Projetiva.

Vale lembrar que nestes testes podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos pelo INPE, os valores de erros médios quadráticos (EMQs) correspondentes aos pontos de verificação. A tabela 7.2.2 apresenta as médias dos erros

planimétricos ($\overline{E_p}$) e dos erros médios quadráticos ($\overline{EMQ_p}$) entre os valores obtidos para as coordenadas 'E' e 'N' dos pontos de verificação.

Tabela 7.2.2. : Média geral dos erros planimétricos (E_p) e dos Erros Médios Quadráticos (EMQ_p) entre os valores das coordenadas dos pontos de verificação.

	FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE MODELOS MATEMÁTICOS			
	PROJET	1ºGRAU	2ºGRAU	3ºGRAU
$\overline{E_p}$ (m)	39,83	37,54	42,91	48,14
$\overline{EMQ_p}$ (m)	57,97	51,70	63,56	64,25

Observa-se na tabela 7.2.2 que os valores obtidos neste teste para o Polinômio de Primeiro Grau equivalem aproximadamente aos obtidos pelo INPE para o refinamento de imagens TM no nível 3, ou seja, EMQ : 50 metros. Observa-se também que a Equação Projetiva mostra-se eficiente, apresentando valores finais bastante aceitáveis para o refinamento da imagem TM. Os polinômios de graus superiores não são de utilização aconselhável principalmente em função destes propiciarem a absorção de erros grosseiros.

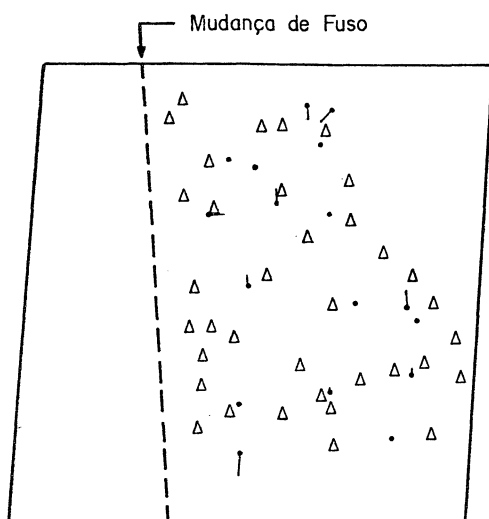
No trabalho com feições retas como controle o tempo de processamento em computador é cerca de quatro vezes maior que com pontos de controle. Isto se deve basicamente a complexidade do modelo matemático.

Na figura 7.2.1, os itens *a*, *b*, *c* e *d* correspondem respectivamente as testes com a Equação Projetiva e com Polinômios do Primeiro, Segundo e Terceiro Graus.

FEIÇÕES RETAS COMO CONTROLE

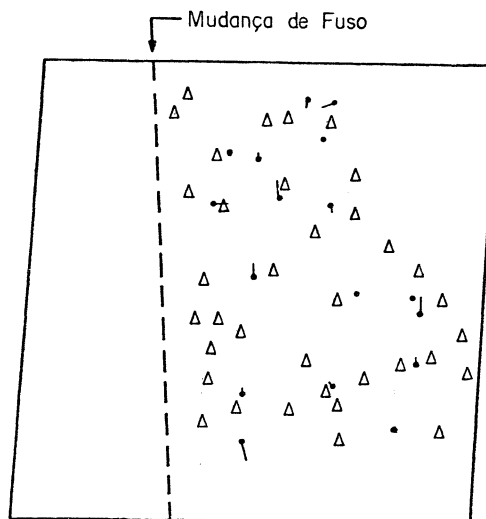
TESTE PARA O FUSO COM M.C. = 45° WGr

a) Equação Projetiva



Δ Ponto central das feições de controle
• Ponto e/ou feição de verificação

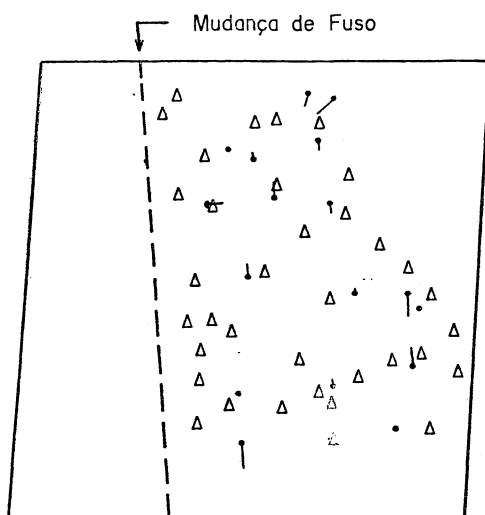
b) Pol. Primeiro Grau



Δ Ponto central das feições de controle
• Ponto e/ou feição de verificação

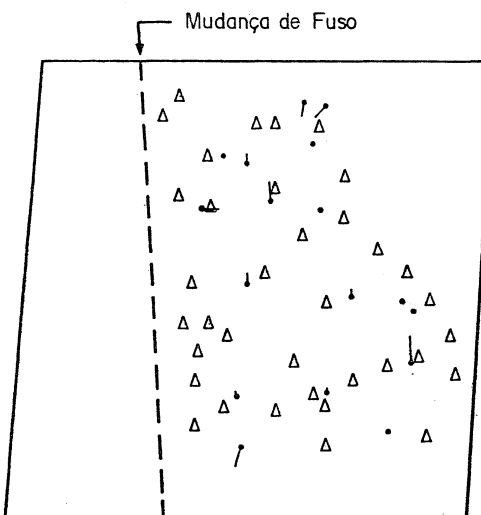
NQ

c) Pol. Segundo Grau



Δ Ponto central das feições de controle
• Ponto e/ou feição de verificação

d) Pol. Terceiro Grau



Δ Ponto central das feições de controle
• Ponto e/ou feição de verificação

Des. Elen A. Andreoli

Figura 7.2.1. : Representação das feições de controle e dos vetores dos erros planimétricos para M.C.: 45° W. Escala da Imagem : 1:3000000. Escala dos vetores de erros: 1:50000.

De maneira geral os erros planimétricos aparecem bem distribuídos na imagem e não apresentam uma tendência definida. A maioria dos pontos e feições de verificação apresentam erro planimétrico inferior a 25 metros, o que lhes confere uma representação puntual nas figuras. Os menores erros planimétricos aparecem para o Polinômio de Primeiro Grau e para a Equação Projetiva, aumentando para os polinômios de graus superiores.

Nota-se ainda que os maiores vetores de erros são os que pertencem a pontos ou feições de verificação externos às feições de controle.

7.3. CONCLUSÕES

Com base no que foi apresentado nos itens anteriores pode-se tirar algumas importantes conclusões a respeito deste trabalho.

A primeira e mais significativa foi a obtenção de resultados de qualidade nos testes com *dados reais* fazendo-se uso de feições como controle.

A segunda conclusão é a de que as feições, sendo mais abundantes na imagem de satélite do que os pontos de controle, possibilitam uma maior facilidade de identificação e escolha de controle para o trabalho de refinamento, mesmo quando se trabalha com imagens pouco providas de pontos de controle.

Neste trabalho utilizou-se uma imagem datada de 1986 e cartas topográficas elaboradas com base em fotografias datadas de 1965 em diante. São portanto 21 anos de diferença entre ambos os registros. Mesmo assim foi possível a identificação de uma grande quantidade de feições para controle, o que vem salientar a vantagem do uso de feições, mesmo com uma diferença temporal significativa entre os dados do trabalho.

Os resultados obtidos com feições retas utilizadas como

controle para o Polinômio de Primeiro Grau mostram-se tão precisos quanto os obtidos pelo INPE utilizando pontos de controle. Deve-se destacar que no caso dos testes do INPE, se utiliza como área teste um setor da imagem TM bastante rico em pontos de controle, distribuídos de forma homogênea pela área de estudo. Neste trabalho, além da escolha de uma área de aproximadamente 23500 quilômetros quadrados, trabalhou-se com uma imagem absolutamente comum, com problemas como ausência de algumas cartas topográficas que cobriam a área.

Além disso, os modelos matemáticos e de ajustamento utilizando-se feições mostraram-se eficientes numericamente porém, com a desvantagem de um maior tempo de processamento em computador.

7.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresenta-se como recomendações para trabalhos futuros:

a. A utilização de imagens que já foram alvo de estudo por instituições como o INPE, por exemplo, em testes de modelos de refinamento de imagens de satélite. Estas mesmas imagens poderiam ser refinadas utilizando-se feições retas como controle e os resultados alcançados poderiam ser comparados. Desta forma seria possível uma comparação entre pontos de verificação para testes com feições e com pontos de controle;

b. a utilização de feições curvas juntamente com feições retas nos testes de modelos matemáticos de refinamento de imagens de satélite, visando com isto um aumento no número de controle disponível nos trabalhos em regiões favorecidas de feições curvas;

c. a realização de testes de refinamento de imagens de

satélite através de feições utilizando-se imagens digitais;

d. que instituições que trabalham com refinamento de imagens de satélite façam uso da metodologia desenvolvida neste trabalho para aperfeiçoarem seus modelos de refinamento, principalmente no caso de imagens onde os pontos de controle são escassos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1011 AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. Manual of Remote Sensing. 2. ed. ASP, Falls Church, 1983.
- 1021 BEZERRA, P.C.R. & D'ALGE, J.C.L. Retificação de imagens TM-LANDSAT através do refinamento de elementos orbitais in: " V Encontro Nacional de Engenheiros Cartógrafos". Presidente Prudente, S.P., 161-168. 1988.
- 1031 DALMOLIN, O. "Ajustamento de observações pelo processo iterativo". Tese de Mestrado. Departamento de Geociências, UFPR, Curitiba, PR. 1976.
- 1041 FORD, G.E. & ZANELLI, C.I. " Analysis and Quantification of Errors in the Geometric Correction of Satellite Images". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Falls Church, vol 51(11):1725-34, 1985.
- 1051 FORSHAW, M.R. et alli. A Review Paper: Spatial Resolution of Remotely Sensed Imagery. U. S. Committee for Peaceful of Outer Space. 53pp. 1980.
- 1061 KRATKY, V. Photogrammetric Solution for Precision Processing of EARTS Images in: "XXI International Congress of Photogrammetry", Ottawa, 1972.
- 1071 LUGNANI, J.B. Control Features : An Alternative Source for Urban Area Control in: "XV Congress of the ISP", Rio de Janeiro, RJ. Comissão III, 649-656. 1984.
- 1081 . Quality Estimation for digitized Features - A New Approach in: "XV Congress of the ISP", Rio de Janeiro, RJ. Comissão IV, 248-252. 1984.
- 1091 "Using Digital Entities as Control". Ph.D. Thesis, Department of Surveying Engineering, UNB, 1980.
- 1101 MACHADO E SILVA, A.J.F. Estudo da Qualidade Geométrica das Imagens MSS-LANDSAT. São José dos Campos, INPE, 1983. No prelo.

- 1111 . Modelo Fotogramétrico para Correção de Imagens MSS-LANDSAT. São José dos Campos, INPE, 1984. No prelo.
- 1121 MACHADO E SILVA, A.J.F. & D'ALGE, J.C.L. Avaliação da Qualidade Geométrica das Imagens TM-LANDSAT. São José dos Campos, INPE, 1986. No prelo.
- 1131 MASRY, S.E. Digital Mapping Using Entities: A New Concept. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Falls Church, vol 48(11):1561-5, 1981.
- 1141 MOFFITT, F. & MIKHAIL, E.N. Photogrammetry. 3. ed. New York, Harper & Row, 1980. 648p.
- 1151 POPE, A.J. Some pitfalls to be avoided in the iterative adjustment of nonlinear problems. NOAA, Geodetic Research and Development Laboratory. Rockville, MD., 1974.
- 1161 SOUZA, F.C.B. "Orientação absoluta de modelos utilizando feições digitalizadas como controle". Tese de Mestrado, Departamento de Geociências, UFPR, Curitiba, PR. 1982.
- 1171 TOMMASELLI, A.M.G. "Um modelo alternativo à equação de colinearidade utilizando feições retas". Tese de Mestrado, Departamento de Geociências, UFPR, Curitiba, PR. 1988.
- 1181 WELCH, R.; JORDAN, T.R. & EHLERS, M. Comparative evaluation of the geodetic accuracy and cartographic potential of LANDSAT-4 and LANDSAT-5 thematic mapper image data". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Falls Church, vol. 51(9): 1249-62, 1985.